

MODELOS PROBABILISTICOS PARA PREDECIR EL DETERIORO DE LA RED VIAL COLOMBIANA CON BASE EN EL CRITERIO TECNICO DE EVALUACION DEL INSTITUTO NACIONAL DE VIAS - INVIA S

ELABORADO POR:
GUSTAVO ADOLFO ACOSTA RUEDA

REQUISITO DE GRADO
MASTER EN INGENIERIA
CIVIL

Director de Tesis: I. C. Luis Guillermo Fuentes P., Ph.D

**MAESTRIA INGENIERIA CIVIL
DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL**



BARRANQUILLA, Junio 2016

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	4
LISTA DE TABLAS	10
1. INTRODUCCION.....	13
2. OBJETIVOS	16
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. CONTRIBUCIÓN A LA INVESTIGACIÓN	17
4. REVISIÓN DEL PROGRAMA DE ADMINISTRADORES VIALES	18
4.1. ADMINISTRADORES VIALES: MARCO LEGAL	18
4.2. METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN: CRITERIO VISUAL Y CRITERIO TÉCNICO	21
4.2.1. Generalidades.....	21
4.2.2. Criterio visual	22
4.2.3. Criterio Técnico.....	23
4.2.3.1. Descripción del formato de Criterio Técnico	24
5. SISTEMAS DE GESTION DE PAVIMENTO	48
5.1. GENERALIDADES	48
5.2. TIPOS DE DAÑOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES	57
5.2.1. Daños Funcionales En Pavimentos Flexibles	57
5.2.1.1. Pérdida De Agregados En Tratamientos Superficiales	58
5.2.1.2. Descascaramiento: Pérdida de capa de rodadura	59
5.2.1.3. Ojo De Pescado o Bache Superficial	61
5.2.1.4. Exudación Del Asfalto: Sangrado	63
5.2.1.5. Pulimento de Agregados.....	64
5.2.1.6. Cabeza Dura (Pérdida De Película De Ligante)	65
5.2.2. Daños Estructurales De Pavimentos Flexibles	65
5.2.2.1. Ahuellamiento	66

5.2.2.2. Baches Profundos.....	67
5.2.2.3. Ondulaciones.....	69
5.2.2.4. Grieta Longitudinal.....	70
5.2.2.5. Grieta Transversal	71
5.2.2.6. Falla En Bloque.....	72
5.2.2.7. Piel De Cocodrilo	73
6. DESARROLLO DE MATRICES DE TRANSICION DE PROBABILIDAD	75
6.1. GENERALIDADES	75
6.2. MODELOS DE DETERIORO	75
6.2.1. Teoría De Markov Aplicada Al Deterioro Del Pavimento	77
6.3. CATEGORIZACIÓN DE DATOS.....	82
6.4. GENERACIÓN DE MATRICES DE TRANSICIÓN DE PROBABILIDAD..	90
6.5. ANÁLISIS DINÁMICO PARA LAS MATRICES DE TRANSICIÓN DE PROBABILIDAD	94
6.6. VALIDACIÓN DE MODELOS.....	102
6.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS	108
7. MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL PARA DIFERENTES TIPOS DE DAÑO DEL PAVIMENTO	112
7.1. GENERALIDADES.....	112
7.2. REGRESIÓN LINEAL SIMPLE	113
7.3. VALIDACIÓN DE MODELOS.....	135
7.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	145
8. CONCLUSIONES.....	150
9. FUTURAS INVESTIGACIONES.....	152
RESUMEN	154
10. BIBLIOGRAFIA.....	155

LISTA DE FIGURAS

• Figura 4.1: Portada de un informe de tipo de Criterio Técnico por parte de los Administradores Viales.	23
• Figura 4.2: Formato de presentación grafica de la distribución porcentual del estado de una vía.	46
• Figura 5.1: Ciclo de vida de un pavimento con sus respectivas fases.....	50
• Figura 5.2: Descripción del ciclo deseado y no deseado en un sistema de gestión de pavimentos.	50
• Figura 5.3: Estructura jerárquica de un Sistema de Gestión de Pavimento.....	51
• Figura 5.4: Componentes esenciales de todo sistema de gestión de pavimentos.	52
• Figura 5.5: Ciclo y etapas convencionales de todo sistema de gestión de pavimentos según el Construction Specifications Institute (CSI, 2002).	56
• Figura 5.6: Apariencia de un pavimento afectado por perdida de agregados... 58	
• Figura 5.7: Apariencia de un pavimento afectado por descascaramineto.	59
• Figura 5.8: Apariencia de un pavimento afectado por Bache superficial.	61
• Figura 5.9: Apariencia de un pavimento afectado por exudación del asfalto....	63
• Figura 5.10: Apariencia de un pavimento afectado por Pulimiento.....	64
• Figura 5.11: Apariencia de un pavimento afectado por Pérdida De Película De Ligante.....	65
• Figura 5.12: Apariencia de un pavimento afectado por Ahuellamiento.....	66
• Figura 5.13: Apariencia de un pavimento afectado por Baches profundos.....	68
• Figura 5.14: Apariencia de un pavimento afectado por Ondulaciones.....	69
• Figura 5.15: Apariencia de un pavimento afectado por grietas longitudinales..	70
• Figura 5.16: Apariencia de un pavimento afectado por Grietas transversales..	71
• Figura 5.17: Apariencia de un pavimento afectado por Falla en bloque.	72
• Figura 5.18: Apariencia de un pavimento afectado por Pérdida De Película De Ligante.....	73
• Figura 6.1: Tipología de modelos probabilísticos (Zheng Li, 2005).	79

- Figura 6.2: Medición de TPD para cada una de las vías de Colombia según Aforos realizados por el INVIAS. 83
- Figura 6.3: Curva de ponderación de temperaturas ambiente; Carta W..... 87
- Figura 6.4: Simulación de estado ideal para cada una de las nueve matrices de transición de probabilidad para las vías de Colombia..... 92
- Figura 6.5: Respuesta típica de un proceso dinámico de primer orden con tiempo muerto. 95
- Figura 6.6: Respuesta típica de un proceso dinámico de primer orden donde se puede apreciar el parámetro “constante de tiempo”. En este ejemplo, la gráfica muestra la variación de la temperatura (°C) en función del tiempo. 95
- Figura 6.7: Ajuste de primer orden para el escenario [A,A]. En negro calificación predicha por la MTP [A,A], en azul el modelo ajustado. A la derecha se presenta la forma funcional del modelo ajustado. Software Matlab®. 99
- Figura 6.8: Ajuste de segundo orden para el escenario [A,A]. En negro calificación predicha por la MTP [A,A], en verde el modelo ajustado. A la derecha se presenta la forma funcional del modelo ajustado. Software Matlab®. 99
- Figura 6.9: Ajuste de tercer orden para el escenario [A,A]. En negro calificación predicha por la MTP [A,A], en rojo el modelo ajustado. A la derecha se presenta la forma funcional del modelo ajustado. Software Matlab®. 100
- Figura 6.10: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [A,A], correspondiente a la vía T De Santa Rosa - Santa Catalina (Bolívar). 103
- Figura 6.11: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [M,A], correspondiente a la vía Socorro - Berlín (Santander)..... 104
- Figura 6.12: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [B,A], correspondiente a la vía Puente Blanco-Sogamoso (Boyacá). 104
- Figura 6.13: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [A,M], correspondiente a la vía Aracataca-La Gran Vía (Magdalena). 105

- Figura 6.14: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [B,M], correspondiente a la vía Anserma-Riosucio (Caldas). 106
- Figura 6.15: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [A,B], correspondiente a la vía El Viajano - San Marcos (Córdoba). 106
- Figura 6.16: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [M,B], correspondiente a la vía Uribe-Sevilla (Valle Del Cauca). ... 107
- Figura 6.17: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [B,B], correspondiente a la vía Te De Viani-Cambao (Cundinamarca). 107
- Figura 7.1: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [A,A], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros. 115
- Figura 7.2: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [A,A], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.. 116
- Figura 7.3: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [M,A], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros. 117
- Figura 7.4: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [M,A], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.. 118
- Figura 7.5: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [B,A], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros. 119
- Figura 7.6: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [B,A], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.. 120
- Figura 7.7: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [A,M], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros. 121

- Figura 7.8: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [A,M], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.. 122
- Figura 7.9: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [M,M], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros. 123
- Figura 7.10: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [M,M], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.. 124
- Figura 7.11: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [B,M], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros. 125
- Figura 7.12: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [B,M], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.. 126
- Figura 7.13: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [A,B], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros. 127
- Figura 7.14: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [A,B], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.. 128
- Figura 7.15: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [M,B], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros. 129
- Figura 7.16: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [M,B], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.. 130
- Figura 7.17: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [B,B], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros. 131

- Figura 7.18: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [M,B], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.. 132
- Figura 7.19: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [A,A] correspondiente a la vía CERETE-ESTACION SAN MARTIN (Córdoba), generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros. 136
- Figura 7.20: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [M,A], correspondiente a la vía VENADILLO - LERIDA (Tolima) generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros. 137
- Figura 7.21: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [B,A], correspondiente a la vía TUNJA-MORTIÑAL (Boyacá) generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros. 138
- Figura 7.22: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [A,M], correspondiente a la vía LA DONJUANA-DURANIA (Norte de Santander) generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros. 139
- Figura 7.23: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [M,M], correspondiente a la vía BOLIVAR-RIO FRIO (Valle del Cauca) generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros. 140
- Figura 7.24: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [B,M], correspondiente a la vía PUENTE LA LIBERTAD - LA ESPERANZA (Caldas) generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros..... 141
- Figura 7.25: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [A,B], correspondiente a la vía ALGARROBO-SI DIOS QUIERE (Magdalena) generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros. 142

- Figura 7.26: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [M,B], correspondiente a la vía JARDIN-REMOLINO (Antioquia) generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros. 143
- Figura 7.27: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [B,B], correspondiente a la vía BELEN-PAZ DE RIO (Boyacá) generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros. 144
- Figura 7.28: Variación de las tasas de deterioro de cada tipo de daño para los diferentes escenarios para los modelos de regresión lineal simple libres. 147
- Figura 7.29: Variación de las tasas de deterioro de cada tipo de daño para los diferentes escenarios para los modelos de regresión lineal con intercepto forzado a cero..... 147

LISTA DE TABLAS

• Tabla 4.1: Datos del formato del Criterio Visual desagregados por kilómetro. Fuente: Informe Criterio Visual Territorial Tolima, Tercer trimestre de 2008. ...	22
• Tabla 4.2: Formato de registro del estado superficial del pavimento y de estructuras complementarias en la evaluación del Criterio Técnico.	24
• Tabla 4.3: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente al “PR Inicial y PR Final”.	25
• Tabla 4.4: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente a la “Distancia”.	26
• Tabla 4.5: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente al “Ancho de la Sección”.	27
• Tabla 4.6: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente al “Área de la Sección”.	27
• Tabla 4.7: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente a “Bermas”.	28
• Tabla 4.8: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente a “Daños en la Calzada”.	30
• Tabla 4.9: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente a “Área Dañada de Bermas”.	33
• Tabla 4.10: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente al “Estado de la Superficie”.	34
• Tabla 4.11: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente al “Drenaje y Zonas Laterales”.	40
• Tabla 4.12: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente a la “Señalización”.	43
• Tabla 4.13: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente a la “Calificación Total de la Sección” o Índice de Estado Superficial (ISE).	45
• Tabla 4.14: Categorización del ISE calculado por el Criterio Técnico según INVIA.	45

- Tabla 4.15: Criterios de ponderación del estado según el área afectada por cada tipo de deterioro. Fuente: INVIAS..... 47
- Tabla 5.1: Categorización de daños comunes que se presentan en la superficie del pavimento. 57
- Tabla 5.2: Categorización de daños comunes que se presentan en la estructura del pavimento. 66
- Tabla 6.1: Clasificación de tramos de vía en estudio según flujo vehicular. 84
- Tabla 6.2: Categorización del clima según temperatura promedio de los últimos 10 años para cada territorial y Temperatura Media Anual Ponderada (TMAP). 87
- Tabla 6.3: Convección utilizada para cada una de las Nueve categorías de Temperatura y TPD. 88
- Tabla 6.4: Relación de tramos utilizados en esta investigación en cada uno de los escenarios generados según temperatura y volúmenes de tránsito. 89
- Tabla 6.5: Matrices de Transición de Probabilidad para cada uno de los escenarios de TPD y temperatura para las vías de Colombia..... 91
- Tabla 6.6: Ponderación establecida por el INVIAS para cada uno de los posibles estados de red vial..... 93
- Tabla 6.7: Valores de constantes de tiempo obtenidos para los modelos dinámicos de tercer orden generados para las puntuaciones de las vías en función del tiempo en cada escenario. Se resalta en gris la constante de tiempo efectiva (τ_{effect}) o IC asociada a cada escenario..... 98
- Tabla 6.8: Índice de criticidad (IC) asociado a cada escenario generado para los factores de temperatura y TPD. La escala de colores indica la variación de los valores del IC, siendo rojo el valor más pequeño y verde el valor más grande. 99
- Tabla 6.9: Parámetros calibrados para la función de transferencia de pulso para cada escenario de análisis. 101
- Tabla 6.10: Ranking de criticidad para todos los escenarios de Temperatura-TPD, ordenados según el valor de la constante de tiempo asociada a cada uno para una función de transferencia de pulso. 102
- Tabla 6.11: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [M,M], correspondiente a la vía La Dorada-Caño Alegre (Tolima). 105

- Tabla 6.12: a) Valores promedios de las probabilidades de transiciones de estado a nivel de red de cada uno de los nueve escenarios de Temperatura-TPD generados. b) Transiciones de calificación y su probabilidad. La escala de colores se emplea con el fin de facilitar la visualización de la magnitud de los valores. Verde para el mayor valor, que es “uno” y rojo para el menor valor, que es “cero”. 110
- Tabla 7.1: Resumen de los parámetros constitutivos de los *modelos de regresión lineal*, generados para los diferentes tipos de deterioro, en cada una de las nueve categorías de estudio. 133
- Tabla 7.2: Resumen de los parámetros constitutivos de los *modelos de regresión lineal con intercepto fijo en cero*, generados para los diferentes tipos de deterioro, en cada una de las nueve categorías de estudio..... 134
- Tabla 7.3: Resumen Modelos lineales libres para fenómenos de deterioro del pavimento arreglados por escenarios de Temperatura-TPD..... 149
- Tabla 7.4: Resumen Modelos lineales con intercepto fijo en cero para fenómenos de deterioro del pavimento arreglados por escenarios de Temperatura-TPD.149

1. INTRODUCCION

Uno de los factores que mayor influencia tiene en el nivel de desarrollo y crecimiento económico de un país, lo constituye en gran medida el grado de conectividad vial entre regiones, departamentos, municipios y demás poblaciones, así como también la calidad de las condiciones de servicio en términos funcionales y estructurales de la infraestructura vial propia de dichas conexiones, lo cual garantiza el desplazamiento de vehículos y productos de forma eficiente, confortable y segura. En ese sentido el pavimento se consolida como elemento básico y principal de la infraestructura vial, y por lo tanto se le debe optimizar al máximo, con el fin no solo de que esté pueda cumplir con la vida útil para el cual fue diseñado, sino también, para que se le pueda sacar el máximo provecho a través de mantenimientos constantes y periódicos que posibiliten un adecuado aprovechamiento de los recursos invertidos, ello en razón de que el pavimento como elemento estructural, requiere importantes inversiones financieras tanto para la construcción como para el mantenimiento. En ese sentido, el estado o la calidad de la infraestructura vial afecta directamente los costos asociados con su uso. Vías deterioradas disminuyen dramáticamente la eficiencia en los tiempos de transporte (productividad), aumentan los costos de mantenimiento de los vehículos, y tienen una incidencia negativa en la movilidad.

En consecuencia, resulta supremamente relevante para las autoridades gubernamentales, locales y nacionales, implementar sistemas de gestión de la infraestructura vial que posibiliten garantizar por un determinado periodo de tiempo las condiciones de seguridad, comodidad y capacidad estructural adecuadas para la circulación del tránsito, minimizando los costos de reinversión, así como los costos sociales y ecológicos en los que se incurran. Es aquí donde toman gran relevancia los modelos de deterioro, ya que estos permiten gestionar el sistema de pavimentos, permitiéndonos priorizar proyectos de intervención y hacer un uso eficiente de los recursos disponibles, al conocer las condiciones de determinado pavimento en cualquier instante de tiempo, teniendo claro el régimen de tránsito que circula sobre él y las condiciones ambientales en las que se encuentra.

En vista de la necesidad de un monitoreo continuo y permanente sobre la red vial colombiana, el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) implementó el programa de Administradores Viales. Este programa realiza la valoración del estado de la infraestructura vial del país, a través de dos metodologías: a) el Criterio Técnico y b) el Criterio Visual, dando así herramientas veraces y un diagnóstico confiable a los entes encargados de la toma de decisiones y destinación de recursos concernientes al mantenimiento de las vías del país.

Los Administradores Viales son una figura ideada con el objetivo principal de velar por el mantenimiento y sostén de la red vial de Colombia, con el propósito de contribuir al desarrollo económico y social. En el decreto 2474 de 2008 consta que los Administradores Viales deben coadyuvar a “(...) garantizar a la sociedad la construcción, mejoramiento y mantenimiento de la infraestructura vial no concesionada a cargo de la entidad (INVIAS) (...)”. Ya que las vías del país son patrimonio nacional, la labor de los Administradores Viales es de suma importancia.

Para evaluar la condición del pavimento los Administradores Viales utilizan indicadores de su estado funcional realizando un inventario detallado de las fallas y daños superficiales de la superficie del pavimento consignados en el reporte del Criterio Técnico. Los deterioros tenidos en cuenta son: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimiento, Ahuellamineto y Otro tipo de deterioros en general.

En el presente informe se presenta un análisis de la malla vial colombiana a la luz de teorías probabilísticas y determinísticas, las cuales permite caracterizar el comportamiento del proceso de deterioro de los pavimentos, y que es aplicada a los tramos carreteros circunscritos dentro de las distintas entidades territoriales de Colombia. Fueron tenidos en cuenta en esta investigación los efectos del clima y del tráfico de la vía, obteniendo así Matrices de Transición de Probabilidad y curvas para cada fenómeno de deterioro, que permiten observar la tendencia o tasa de deterioro del pavimento.

El documento presente consta de nueve (9) capítulos cuyo contenido se describe brevemente a continuación:

- En el Capítulo 1 se hace una introducción del contenido de la presente investigación.
- En el Capítulo 2 se definen los objetivos tanto generales como específicos de la presente investigación.
- En el Capítulo 3 se presentan contribuciones de la presente investigación.
- En el Capítulo 4 se presentan nociones generales del programa de Administradores Viales del INVIAS, los diferentes criterios de evaluación, y la metodología de medición implicada en cada una de ellas.
- En el Capítulo 5 se define el marco teórico de los modelos de deterioro, se definen sus características y cuál es la importancia de los mismos dentro de un sistema de gestión. También se describe la teoría de los modelos Markov y la metodología para generar las matrices de transición de probabilidad, TPM (por sus siglas en inglés), obteniendo el deterioro del pavimento con el tiempo.
- En el Capítulo 6 se detalla el desarrollo de las TPM para las vías de Colombia, teniendo en cuenta diferentes escenarios. Se presentan también casos de aplicación de estos modelos y se comparan sus resultados con datos observados.
- En el Capítulo 7 se describe el método de “ventanas” y el desarrollo de modelos de regresión lineal, tanto libres como fijando el valor del intercepto a cero, para cada uno de los diferentes tipos de deterioro del pavimento tenidos en cuenta por el INVIAS.
- En el Capítulo 8 se presentan las conclusiones más relevantes que se obtuvieron como resultado en la presente investigación.
- En el Capítulo 9 se describen brevemente las posibles líneas o temas de investigación complementarias a la presentada en este documento.
- Para terminar, se presenta la bibliografía y los anexos correspondientes. Estos últimos por su naturaleza digital se encuentran contenidos en el cd que acompaña la versión física de este documento.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

El principal objetivo de la investigación consignada en este documento es el de desarrollar modelos probabilísticos para determinar el estado de deterioro general de los pavimentos flexible en las vías de Colombia basados en el Índice Superficial de Estado (ISE) utilizado por INVIAS. De manera complementaria también se busca determinar modelos para cada uno de los diferentes fenómenos de deterioros superficial tenidos en cuenta en el cálculo del ISE. La metodología adoptada para este análisis considera los dos principales agentes que están involucrados en el proceso de deterioro de la estructura del pavimento, que son la Temperatura y el Tránsito Vehicular, y la variabilidad de ambos a lo largo y ancho del territorio nacional.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para poder lograr el objetivo general de esta investigación son necesarios los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar el estado del arte a nivel nacional e internacional de los diferentes modelos y metodologías utilizadas para la predicción del comportamiento del deterioro de pavimentos, las hipótesis que consideran, su naturaleza, sus limitaciones y su importancia en los sistemas de gestión de pavimentos.
- Generar Matrices de Transición de Probabilidad para predecir la distribución porcentual del estado de la estructura del pavimento en las categorías de calidad del ISE para cada una de las combinaciones de Temperatura-Tránsito consideradas.
- Determinar un índice de criticidad para Matrices de Transición de Probabilidad a través de un análisis dinámico.
- Generar, a través del método de “ventanas”, modelos de regresión Lineal libres y restringidos, para los diferentes tipos de deterioros involucrados en la evaluación del Criterio Técnico.
- Comparar el comportamiento de las tasas de deterioro de los tipos de daños del pavimento bajo diferentes condiciones de Temperatura-Tránsito.

3. CONTRIBUCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

La investigación realizada y consignada en el presente documento es de gran utilidad para el INVIAS y para los entes gubernamentales encargados de la toma de decisiones, en cuanto a la destinación de recursos económicos para el mantenimiento preventivo de las vías de Colombia, ya que constituye una herramienta que permite priorizar la intervención y el monto de inversión de rehabilitación de vías según su nivel de criticidad. También es de gran utilidad en el campo académico, ya que suministra valiosa información acerca del comportamiento de diferentes fenómenos de deterioro de pavimentos flexibles de forma independiente, sometidos a un amplio espectro de condiciones climáticas y de tránsito.

Las principales contribuciones al estado del arte de esta investigación son:

- Revisión de la metodología de supervisión, control del deterioro e intervención de los pavimentos (Sistema de Gestión de Pavimentos) de Colombia utilizada por INVIAS a través de su programa de Administradores Viales.
- Desarrollo de Matrices de Transición de Probabilidad (MTP) que permitan predecir el ISE de los pavimentos para todas las regiones del país categorizadas en tres niveles de temperatura (Alto, Medio y Bajo) y tres niveles de tránsito (Alto, Medio y Bajo); esto es, nueve escenarios de análisis diferentes.
- Aporte de un coeficiente que permite la determinación de la criticidad o el grado de agresividad de una MTP.
- Determinación de modelos de predicción para los fenómenos superficiales de deterioro de los pavimentos flexibles más relevantes (Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimiento y Ahuellamineto) categorizadas también, en tres niveles de temperatura (Alto, Medio y Bajo) y tres niveles de tránsito (Alto, Medio y Bajo); esto es, nueve escenarios de análisis diferentes.

4. REVISIÓN DEL PROGRAMA DE ADMINISTRADORES VIALES

4.1. ADMINISTRADORES VIALES: MARCO LEGAL

Los Administradores Viales son una figura ideada con el objetivo principal de velar por el mantenimiento y sostén de la red vial de Colombia, con el propósito de contribuir al desarrollo económico y social. En el decreto 2474 de 2008 consta que los Administradores Viales deben coadyuvar a “(...) *garantizar a la sociedad la construcción, mejoramiento y mantenimiento de la **infraestructura vial no concesionada** a cargo de la entidad (INVÍAS) (...)*”. Al ser las carreteras patrimonio nacional, el trabajo desarrollado por los Administradores de Mantenimiento Vial es de altísima relevancia.

En nuestro país hay aproximadamente 11357 km de vías nacionales las cuales están a cargo de 72 Administradores Viales. Por estas vías nacionales se transportan aproximadamente 100 millones de toneladas de carga por año. De aquí el interés por mantener la red vial en perfecto funcionamiento y propender por el oportuno mantenimiento de la infraestructura.

Según el Elemento No.1 Artículo 3 del Decreto No. 2474 de 2008, las funciones de los Administradores Viales son:

1. Participar activamente en la prevención de riesgos y atención de las emergencias que se presenten en las vías.
2. Alertar oportunamente al INVÍAS sobre la necesidad de diseñar y construir obras especiales para la mitigación de la inestabilidad en sitios críticos, así como la necesidad de diseñar y construir obras de conservación, mejoramiento o recuperación. Dentro del inventario de necesidades debe indicar los presupuestos y priorizar.
3. Diseñar obras y adelantar acciones en relación con el entorno de la vía, encaminadas a su ornato y a la preservación del medio ambiente. En este orden, se ha incluido la obligatoriedad de los contratistas de obras para desarrollar programas de reforestación y/o arborización paisajística, en estricto cumplimiento de los lineamientos establecidos en la Guía de Manejo Ambiental de Proyectos de

Infraestructura - Subsector Vial, del año 2007, para lo cual el Administrador Vial debe prestar apoyo a la respectiva Dirección Territorial. Así mismo, a efectos de contar con un inventario preliminar de las zonas de derecho de vía que brinden condiciones adecuadas para el desarrollo de este programa, el Administrador Vial debe adelantar un inventario de los sitios disponibles y aptos para el desarrollo de proyectos de arborización paisajística, con el desarrollo de las siguientes actividades básicas: identificar las zonas de derecho de vía y los metros lineales disponibles y viables para arborizar, relacionar los predios del INVIAS que cuenten con áreas para arborizar, anotando su ubicación y extensión aproximada y anexar registro fotográfico de los sectores factibles a ser arborizados. Igualmente, durante la actividad de inventario de zonas, el Administrador Vial debe realizar el inventario de los árboles ubicados en los corredores viales que presenten mal estado y puedan colapsar, ocasionando daños a terceros, siendo causa frecuente de demandas al INVIAS.

4. Planear, organizar, dirigir, coordinar, evaluar y controlar las actividades de mantenimiento rutinario de las carreteras que se le asignen y ejercer su interventoría.
5. Actualizar los costos de mantenimiento vial (Análisis de Precios Unitarios - APU) y suministrar la información requerida para los diferentes sistemas de administración de carreteras que utiliza el INVIAS.
6. Mantener actualizado el sistema de referenciación vial, con base en la información que le suministre el INVIAS y reponer los postes de referencia que hagan falta en las vías a su cargo.
7. Inspeccionar los puentes de manera rutinaria, dirigir y verificar su mantenimiento rutinario y periódico y presentación del informe correspondiente con recomendaciones de inspecciones especiales.
8. Capacitar cada mes a los miembros de las microempresas encargadas del mantenimiento rutinario, en los temas relacionados con el mantenimiento rutinario de carreteras, puentes, aspectos administrativos y de economía solidaria.

9. Participar en las reuniones de coordinación con la Dirección Territorial, evaluaciones de gestión y eventos de transferencia de tecnología que el INVÍAS programe para los ingenieros de la Administración Vial en diferentes sitios del País.
10. Evaluar con criterio de transitabilidad (visual) el estado de la red vial a su cargo con la metodología suministrada por el INVÍAS.
11. Apoyar la supervisión de la Territorial en los contratos que ejecute el INVÍAS en sectores de carreteras a su cargo.
12. Establecer las necesidades de las vías y puentes en materia de señalización vertical y horizontal, llevar un inventario de necesidades de señalización.
13. Actualizar la información existente de accidentalidad y cuando se requiera realizar estudios y presentar recomendaciones técnicas encaminadas al mejoramiento de la seguridad vial.
14. Proporcionar datos para el cálculo del patrimonio de las vías objeto del contrato.
15. Velar por el cumplimiento de la reglamentación referente al buen uso y defensa de las vías y gestionar acciones que brinden servicios a los usuarios de las carreteras en coordinación con las Direcciones Territoriales y las autoridades locales competentes.
16. Supervisar los conteos manuales de tránsito y verificar la toma de información en campo.
17. Llevar a efecto la toma de información de la vía a su cargo con un equipo de GPS, cuya referencia y metodología será indicada oportunamente por el INVÍAS.
18. Realizar estimativos sobre la vida residual de los pavimentos de los sectores a su cargo.
19. Evaluar con Criterio Técnico el estado de la red vial semestralmente con la metodología suministrada por el INVÍAS.
20. Realizar encuestas de origen y destino, flujo de carga, pasajeros y tipo de carga.

21. Realizar la Interventoría de las obras que le sean asignadas, siguiendo las actividades contenidas en el Manual de Interventoría adoptado mediante Resolución N° No. 3009 del 13 de julio de 2007.

22. Colaborar en la toma de la geo referenciación contratada por el INVIAS para la elaboración del mapa digital de la red vial.

23. Efectuar estudios tendientes a solucionar problemas de inestabilidad en las vías a su cargo, cuando se lo requiera el INVIAS y su costo se encuentre dentro del presupuesto de su propuesta.

4.2. METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN: CRITERIO VISUAL Y CRITERIO TÉCNICO

4.2.1. Generalidades

Los datos utilizados para el desarrollo de los modelos presentados en esta investigación fueron suministrados por el INVIAS en el marco del ***Proyecto INVIAS para el desarrollo de un sistema de gestión integral para la infraestructura vial colombiana***. Estos datos consistían en la recopilación de los informes de la inspección de las vías no concesionadas de Colombia realizada por los Administradores Viales con la metodología del Criterio Técnico.

Como se mencionó anteriormente la figura de Administradores Viales fue creada por el INVIAS con el fin de realizar la supervisión de las vías de Colombia no concesionadas. Esta supervisión se lleva a cabo a la luz de dos tipos de análisis: i) Criterio Visual y ii) Criterio Técnico. A continuación, se procede a realizar una breve explicación de cada una de estas metodologías de supervisión y calificación de pavimentos.

4.2.2. Criterio visual

Consiste en una inspección vial de carácter cualitativo que tiene como base de evaluación el criterio de la transitabilidad. No hay unos parámetro establecidos o fijados por el INVIAS para categorizar el estado del pavimento. Se clasifica el estado del pavimento en tres categorías: Bueno, Regular y Malo. La periodicidad de la realización de esta inspección es trimestral y la observación y la clasificación por tramos de un kilómetro se registra en el formato mostrado a continuación en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Datos del formato del Criterio Visual desagregados por kilómetro. Fuente: Informe Criterio Visual Territorial Tolima, Tercer trimestre de 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS DIRECCION TERRITORIAL TOLIMA

CUADRO No 3

ESTADO DE LA RED CRITERIO VISUAL

INGENIERO RESIDENTE: JORGE MILLAN

PERIODO EVALUADO: JULIO-AGOSTO-SEPTIEMBRE

CODIGO VIA	PR INICIAL	PR FINAL	CARRETERA	mts	ESTADO
4510	0 + 0000	1 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	931	Bueno
4510	1 + 0000	2 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	1,096	Bueno
4510	2 + 0000	3 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	894	Bueno
4510	3 + 0000	4 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	1,106	Bueno
4510	4 + 0000	5 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	919	Bueno
4510	5 + 0000	6 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	1,064	Bueno
4510	6 + 0000	7 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	1,026	Bueno
4510	7 + 0000	8 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	990	Bueno
4510	8 + 0000	9 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	1,062	Bueno
4510	9 + 0000	10 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	952	Bueno
4510	10 + 0000	11 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	938	Regular
4510	11 + 0000	12 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	1,002	Regular
4510	12 + 0000	13 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	1,047	Regular
4510	13 + 0000	14 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	1,024	Regular
4510	14 + 0000	15 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	893	Regular
4510	15 + 0000	16 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	1,156	Bueno
4510	16 + 0000	17 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	925	Bueno
4510	17 + 0000	18 + 0000	HONDA-RIO ERMITAÑO	960	Bueno

Como se observa en la Tabla 4.1 el formato consiste en un formulario donde se registra información como la territorial a la que pertenece la vía, el trimestre y el año al que pertenece el informe, el código de la vía, punto de referencia de inicio, punto de referencia final, nombre de la carretera longitud del tramo (generalmente un kilómetro), tipo de superficie (Generalmente asfáltica) y finalmente la calificación del tramo bajo el Criterio Visual (Bueno, Regular y Malo).

4.2.3. Criterio Técnico

Consiste en una inspección vial mucho más rigurosa y completa que la revisión mediante Criterio Visual, ya que se obtiene a través de la medición y posterior ponderación de los daños de la estructura del pavimento y de las estructuras adyacentes a esta. Se tienen en cuenta fenómenos de deterioros tales como los Baches, las Fisuras, las Deformaciones, los Desprendimientos, el Ahuellamiento, entre otros para la obtención de la calificación final para cada kilómetro de vía.

Posteriormente se clasifica el estado del pavimento en cinco categorías: Muy Bueno, Bueno, Regular, Malo y Muy Malo. La periodicidad de la realización de esta inspección es semestral y la observación y la clasificación por tramos de un kilómetro se registra en el formato mostrado en la Figura 4.2 que se presentara más adelante.

Los informes resumen del Criterio Técnico consisten en archivos de Excel con el siguiente contenido:

-Portada: se presente información general acerca de la vía, la fecha, los tramos particulares de estudio y la información institucional del INVIAS. Ver Figura 4.1.



**INSTITUTO NACIONAL DE VIAS
DIRECCIÓN TERRITORIAL ANTIOQUIA**

**ADMINISTRACIÓN DE MANTENIMIENTO VIAL
CONSORCIO ADMINISTRADORES VIALES
Grupo No. 1**

**CARRETERA:
CHIGORODÓ (EL TIGRE) - DABEIBA, CODIGO 6202**

**EVALUACION ESTADO DE LA VÍA - CRITERIOS TECNICOS
SECTOR: PR11+0000 A PR112+0862**

CAREPA-ANTIOQUIA, JULIO 18 DE 2011

Figura 4.1: Portada de un informe de tipo de Criterio Técnico por parte de los Administradores Viales.

-Vía: es el formato donde se consigna la información de la inspección vial Bajo la metodología del Criterio Técnico. Se presenta información como el código de la vía el tramo correspondiente (Inicio-Fin), tipo de superficie, territorial, fecha y longitud del tramo en kilómetros. En el cuerpo del documento se encuentra la información central del informe que consta de la desagregación por kilómetro del tramo en estudio, características cuantitativas y cualitativas tanto de la superficie del pavimento como de estructuras adyacentes a este, tales como señalización y estructuras hidráulicas. Se encuentran el área afectada en m² y porcentualmente de Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento y Otros daños. Finalmente aparece el Índice superficial de estado (ISE) y su correspondiente calificación cualitativa (Muy Bueno, Bueno, Regula, Malo y Muy Malo). Ver Tabla 4.2.

[illegible]

A continuación se presenta una breve descripción de la información que contiene el formato utilizado por los Administradores Viales para el reporte del estado de las carreteras a cargo de INVIAS.

24

Grupo: Identificación dada a un Administrador Vial dentro de su territorial.

Territorial: División correspondiente a los departamentos.

Tramo: Subdivisión de sectores de vías.

Código de la vía: Numeración realizada por el INVIAS para la identificación de las vías nacionales.

Tipo de superficie: Tipo de superficie que posee la vía (pavimentada/no pavimentada).

PR Inicial: Punto de referencia inicial sobre el abscisado de la vía.

PR Final: Punto de referencia final sobre el abscisado de la vía.

Longitud: Longitud total del tramo de la vía en estudio.

Fecha: Fecha de la realización de la inspección.

Información específica:

Nombre columna (Atributo): “PR”. Esta columna referencia la ubicación de la vía de acuerdo a su abscisado. Esta columna se subdivide en dos columnas más: PR inicial y PR final. Que indican el lugar donde inicia y el lugar en el que termina el segmento de vía en análisis respectivamente. Esta sección del formato de evaluación del Criterio Técnico se aprecia en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente al “PR Inicial y PR Final”.

PR	
Inicial	Final
0 - 0000	1 - 0000
1 - 0000	2 - 0000

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): El valor que ocupa la casilla del primer **PR inicial** es ingresado por el Administrador Vial. La casilla correspondiente al PR final corresponde al valor de PR inicial más 1, ya que la longitud tomada para los segmentos fue de 1km. Se ingresa en el siguiente formato: 3+400, donde “3” es el tercer kilómetro del abscisado de la vía y el número después

del signo más “+” hace referencia a los metros del kilómetro; por lo tanto se tiene que el punto 3+400 es el punto ubicado a 3,4km del comienzo del abscisado de la vía.

Tipos de datos que almacena (numérico o carácter): El valor ingresado en esta casilla es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados: El rango de valores posibles para esta casilla depende de la longitud del tramo en estudio.

Nombre columna (Atributo): “**Distancia**”. Este valor corresponde al valor de la longitud (en metros) del segmento de vía en análisis. La sumatoria de esta columna corresponde a la longitud total del tramo de vía. Esta sección del formato de evaluación del Criterio Técnico se aprecia en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente a la “Distancia”.

Distancia
(m)
1.047
1.194

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): El valor que ocupa esta casilla es ingresado por el Administrador Vial, así que carece de fórmula para su cálculo. Se ingresa la longitud del segmento de la vía medido en campo.

Tipos de datos que almacena (numérico o carácter): El valor ingresado en esta casilla es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados: El rango de valores posibles para esta casilla depende de la longitud del tramo en estudio.

Nombre columna (Atributo): “**Ancho sección**”. Este valor corresponde al valor del ancho (en metros) de la sección del segmento de vía en análisis. Esta sección del formato de evaluación del Criterio Técnico se aprecia en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente al “Ancho de la Sección”.

Ancho Sección (m)
13,0
10,0

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): El valor que ocupa esta casilla es ingresado por el Administrador Vial, así que carece de fórmula para su cálculo. Se ingresa la longitud del ancho de la sección de la vía medido en campo.

Tipos de datos que almacena (numérico o carácter): El valor ingresado en esta casilla es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados: El rango de valores posibles para esta casilla depende de la longitud del ancho de la sección.

Nombre columna (Atributo): “Área sección”. Este valor corresponde al valor del área (en metros cuadrados) de la sección del segmento de vía en análisis. Esta sección del formato de evaluación del Criterio Técnico se aprecia en la Tabla 4.6

Tabla 4.6: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente al “Área de la Sección”.

Area Sección (m ²)
13.611,0
11.940,0

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): el valor de esta casilla es calculado a través de la siguiente la Ecuación 4.1, que se presenta a continuación:

$$Area\ Seccion(m^2) = Ancho\ Seccion\ (m) \times Distancia(m) \quad (4.1)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor ingresado en esta casilla es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para esta casilla depende del ancho y de la distancia de la vía.

Subcategoría: Bermas

Nombre columna (Atributo): “**SI/NO**”. Este valor corresponde al hecho de la existencia o no existencia de bermas en el segmento de vía analizado. Esta sección del formato de evaluación del Criterio Técnico se aprecia en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente a “Bermas”.

B e r m a s		
	Ancho	Area
(Si / No)	Berma	
	(m)	(m ²)
No	0,0	0,0
Si	2,8	3.343,2

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta casilla no posee fórmula para su cálculo, debido a que su contenido es llenado con SI o con NO.

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor ingresado en esta casilla es de tipo carácter.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): Esta casilla solo presenta dos opciones para su llenado SI o NO. Por lo tanto, no posee rango alguno.

Nombre columna (Atributo): “**Ancho**”. Este valor corresponde al valor del ancho (en metros) de la berma del segmento de vía en análisis.

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): El valor que ocupa esta casilla es ingresado por el Administrador Vial, así que carece de fórmula para su cálculo. Se ingresa la longitud del ancho de la berma de la vía medido en campo.

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor ingresado en esta casilla es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para esta casilla depende de la longitud del ancho de la berma.

Nombre columna (Atributo): “**Área**”. Este valor corresponde al valor del área (en metros cuadrados) de la berma del segmento de vía en análisis.

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): El valor que ocupa esta casilla se obtiene mediante la utilización de una fórmula que incluye la condición relacionada con la columna **SI/NO**. Si esta columna posee un “SI” efectúa la siguiente operación que describe la Ecuación 4.2 que se presenta a continuación:

$$\text{Area [berma]}(m^2) = \text{Ancho [berma]} (m) \times \text{Distancia}(m) \quad (4.2)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor ingresado en esta casilla es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para esta casilla depende del ancho de la berma y de la distancia de la vía.

Nombre columna (Atributo): “**Puentes (SI/NO)**”. Este valor corresponde al hecho de la existencia o no existencia de puentes en el segmento de vía analizado.

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta casilla no posee fórmula para su cálculo, debido a que su contenido es llenado con SI o con NO.

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor ingresado en esta casilla es de tipo carácter.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): Esta casilla solo presenta dos opciones para su llenado SI o NO. Por lo tanto, no posee rango alguno.

Subcategoría: Daños en la calzada

Nombre columna (Atributo): “**Área Dañada Baches**”. Este valor corresponde al valor del área (en metros cuadrados y porcentaje) que presenta Baches en la vía en análisis. Esta sección del formato de evaluación del Criterio Técnico se aprecia en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente a “Daños en la Calzada”.

Daños en la calzada					
Area Dañada Baches	Area Fisuras	Area Deformac	Area Desprendim	Ahuella Promd Ahuellamiento	Otros Daños DESGASTE
(m ²) / %	(m ²) / %	(m ²) / %	(m ²) / %	(mm)	(m ²) / %
0,0	543,8	3,0	0,0	0	0
0,0%	4,00%	0,02%	0,00%	10	0,00%
4,3	201,2	0	0	0	426
0,0%	1,69%	0,00%	0,00%	7	3,57%

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte superior corresponde a la medición efectuada en campo del área que presenta Baches, y es ingresado por el Administrador Vial. El dato de la parte inferior corresponde al porcentaje, del segmento de vía analizado, que presenta este tipo de daño. A continuación, se presenta la Ecuación 4.3 para el cálculo del valor inferior:

$$\text{Area dañada baches (\%)} = \frac{\text{Area dañada baches (m}^2\text{)}}{\text{Area Seccion (m}^2\text{)}} \times 100 \quad (4.3)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor superior ingresado en esta casilla es de naturaleza numérica. El valor inferior que es calculado, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior depende del tamaño del daño. El rango de valores posibles para la casilla inferior es de 0 hasta 100%.

Nombre columna (Atributo): “**Área Fisuras**”. Este valor corresponde al valor del área (en metros cuadrados y porcentaje) que presenta Fisuras en la vía en análisis.

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte superior corresponde a la medición efectuada en campo del área que presenta Fisuras, y es ingresado por el Administrador Vial. El dato de la parte inferior corresponde al porcentaje, del segmento de vía analizado, que presenta este tipo de daño. A continuación, se presenta la Ecuación 4.4 para el cálculo del valor inferior:

$$Area\ fisuras\ (\%) = \frac{Area\ fisuras\ (m^2)}{Area\ Seccion\ (m^2)} \times 100 \quad (4.4)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor superior ingresado en esta casilla es de naturaleza numérica. El valor inferior que es calculado, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior depende del tamaño del daño. El rango de valores posibles para la casilla inferior es de 0 hasta 100%.

Nombre columna (Atributo): “Área de deformación”. Este valor corresponde al valor del área (en metros cuadrados y porcentaje) que presenta deformación en la vía en análisis.

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte superior corresponde a la medición efectuada en campo del área que presenta Deformaciones, y es ingresado por el Administrador Vial. El dato de la parte inferior corresponde al porcentaje, del segmento de vía analizado, que presenta este tipo de daño. A continuación, se presenta la Ecuación 4.5 para el cálculo del valor inferior:

$$Area\ deformaciones\ (\%) = \frac{Area\ deformaciones\ (m^2)}{Area\ Seccion\ (m^2)} \times 100 \quad (4.5)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor superior ingresado en esta casilla es de naturaleza numérica. El valor inferior que es calculado, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior depende del tamaño del daño. El rango de valores posibles para la casilla inferior es de 0 hasta 100%.

Nombre columna (Atributo): “Área Desprendimiento”. Este valor corresponde al valor del área (en metros cuadrados y porcentaje) que presenta Desprendimiento en la vía en análisis.

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte superior corresponde a la medición efectuada en campo del área que presenta Desprendimiento, y es ingresado por el Administrador Vial. El dato de la parte inferior corresponde al porcentaje, del segmento de vía analizado, que presenta este tipo de daño. A continuación, se presenta la Ecuación 4.6 para el cálculo del valor inferior:

$$Area\ desprendimiento\ (\%) = \frac{Area\ desprendimiento\ (m^2)}{Area\ Seccion\ (m^2)} \times 100 \quad (4.6)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor superior ingresado en esta casilla es de naturaleza numérica. El valor inferior que es calculado, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior depende del tamaño del daño. El rango de valores posibles para la casilla inferior es de 0 hasta 100%.

Nombre columna (Atributo): “Otros daños/ Desgastes”. Este valor corresponde al valor del área (en metros cuadrados y porcentaje) que presenta desgaste en la vía en análisis.

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte superior corresponde a la medición efectuada en campo del área que presenta desgaste, y es ingresado por el Administrador Vial. El dato de la parte inferior corresponde al porcentaje, del segmento de vía analizado, que presenta este tipo de daño. A continuación, se presenta la Ecuación 4.7 para el cálculo del valor inferior:

$$Area\ desgaste\ (\%) = \frac{Area\ desgaste\ (m^2)}{Area\ Seccion\ (m^2)} \times 100 \quad (4.7)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor superior ingresado en esta casilla es de naturaleza numérica. El valor inferior que es calculado, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior depende del tamaño del daño. El rango de valores posibles para la casilla inferior es de 0 hasta 100%.

Subcategoría: Bermas, Área dañada

Nombre columna (Atributo): “**Bermas Área Dañada**” Este valor corresponde al valor del área de bermas (en metros cuadrados y porcentaje) que presenta daño en la vía en análisis. Esta sección del formato de evaluación del Criterio Técnico se aprecia en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente a “Área Dañada de Bermas”.

Bermas
Area Dañada
(m ²) / %
0
0.00%
0
0.00%

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte superior corresponde a la medición efectuada en campo del área sobre la berma que presenta daño, y es ingresado por el Administrador Vial. El dato de la parte inferior corresponde al porcentaje, del segmento de vía analizado, que presenta este tipo de daño. A continuación, se presenta la Ecuación 4.8 para el cálculo del valor inferior:

$$Area\ dañada\ [Berma]\ (\%) = \frac{Area\ dañada\ [Berma]\ (m^2)}{Area\ Seccion\ (m^2)} \times 100 \quad (4.8)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor superior ingresado en esta casilla es de naturaleza numérica. El valor inferior que es calculado, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior depende del tamaño del daño. El rango de valores posibles para la casilla inferior es de 0 hasta 100%.

Subcategoría: Estado de la superficie. Calificación parcial/ Calificación ponderada. Daños y Bermas.

Nombre columna (Atributo): “**Baches**” Este valor corresponde a la Calificación parcial y Calificación ponderada que se le da a la vía en estudio, respecto al daño de Baches. Esta sección del formato de evaluación del Criterio Técnico se aprecia en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente al “Estado de la Superficie”.

Estado de la Superficie						
Calificación Parcial / Calificación Ponderada						
Daños						
Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimientos	Ahuellamiento	Otros Daños	Bermas
					DESGASTE	
20,0%	12,0%	16,0%	8,0%	8,0%	8,0%	8,0%
1,00000	0,45600	0,80000	0,40000	0,28000	0,40000	0,00000
5,0	3,8	5	5	3,5	5	0
1,00000	0,45600	0,80000	0,40000	0,28000	0,30000	0,40000
5,0	3,8	5	5	3,5	3,75	5

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte inferior corresponde a la calificación dada a una vía según el grado de deterioro de esta. Esta calificación se encuentra en una tabla adjunta al documento. Se emplea un buscador que rastrea un grado de deterioro para un daño específico y le otorga la calificación correspondiente al criterio expresado en la Ecuación 4.9:

$$Cal. Parcial = Buscar(\% de deterioro [Baches]; tabla referencia) \quad (4.9)$$

El valor de la parte superior corresponde a la multiplicación de la calificación encontrada anteriormente por los pesos mostrados para cada tipo de deterioro, como se muestra a continuación en la Ecuación 4.10:

$$Cal. Ponderada = Calificacion Parcial \times Peso Baches \quad (4.10)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor obtenido en la casilla inferior es de naturaleza numérica. El valor calculado para la casilla superior, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior varía de 0 a 1. El rango de valores posibles para la casilla inferior varía de 0 a 5.

Nombre columna (Atributo): “**Fisuras**” Este valor corresponde a la Calificación parcial y Calificación ponderada que se le da a la vía en estudio respecto al daño de Fisuras.

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte inferior corresponde a la calificación dada a una vía según el grado de deterioro de esta. Esta calificación se encuentra en una tabla adjunta al documento. Se emplea un buscador que rastrea un grado de deterioro para un daño específico y le otorga la calificación correspondiente al criterio expresado en la Ecuación 4.11:

$$Cal. Parcial = Buscar(\% \text{ de deterioro } [Fisuras]; \text{ tabla referencia}) \quad (4.11)$$

El valor de la parte superior corresponde a la multiplicación de la calificación encontrada anteriormente por los pesos mostrados para cada tipo de deterioro. Lo anterior se muestra en la Ecuación 4.12 que se presenta a continuación:

$$Cal. Ponderada = Calificacion Parcial \times Peso Fisuras \quad (4.12)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor obtenido en la casilla inferior es de naturaleza numérica. El valor calculado para la casilla superior, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior varía de 0 a 1. El rango de valores posibles para la casilla inferior varía de 0 a 5.

Nombre columna (Atributo): “**Deformaciones**” Este valor corresponde a la Calificación parcial y Calificación ponderada que se le da a la vía en estudio respecto al daño de Deformaciones.

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte inferior corresponde a la calificación dada a una vía según el grado de deterioro de esta. Esta calificación se encuentra en una tabla adjunta al documento. Se emplea un buscador que busca un grado de deterioro para un daño específico y le otorga la calificación correspondiente al criterio expresado en la Ecuación 4.13:

$$Cal. Parcial = Buscar(\% \text{ de deterioro } [Deformaciones]; \text{tabla referencia}) \quad (4.13)$$

El valor de la parte superior corresponde a la multiplicación de la calificación encontrada anteriormente por los pesos mostrados para cada tipo de deterioro. Lo anterior se muestra en la Ecuación 4.14 que se presenta a continuación:

$$Cal. Ponderada = Calificacion Parcial \times Peso Deformaciones \quad (4.14)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor obtenido en la casilla inferior es de naturaleza numérica. El valor calculado para la casilla superior, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior varía de 0 a 1. El rango de valores posibles para la casilla inferior varía de 0 a 5.

Nombre columna (Atributo): “**Desprendimientos**” Este valor corresponde a la Calificación parcial y Calificación ponderada que se le da a la vía en estudio respecto al daño de Desprendimientos.

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte inferior corresponde a la calificación dada a una vía según el grado de deterioro de esta. Esta calificación se encuentra en una tabla adjunta al documento.

Se emplea un buscador que explora un grado de deterioro para un daño específico y le otorga la calificación correspondiente al criterio expresado en la Ecuación 4.15:

$$Cal.Parcial = Buscar(\% \text{ de deterioro } [Deformaciones]; \text{tabla referencia}) \quad (4.15)$$

El valor de la parte superior corresponde a la multiplicación de la calificación encontrada anteriormente por los pesos mostrados para cada tipo de deterioro. Lo anterior se muestra en la Ecuación 4.16 que se presenta a continuación:

$$Cal.Ponderada = Calificacion Parcial \times Peso Deformaciones \quad (4.16)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor obtenido en la casilla inferior es de naturaleza numérica. El valor calculado para la casilla superior, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior varía de 0 a 1. El rango de valores posibles para la casilla inferior varía de 0 a 5.

Nombre columna (Atributo): “**Ahuellamiento**” Este valor corresponde a la Calificación parcial y Calificación ponderada que se le da a la vía en estudio respecto al daño de Ahuellamiento.

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte inferior corresponde a la calificación dada a una vía según el grado de deterioro de esta. Esta calificación se encuentra en una tabla adjunta al documento. Se emplea un buscador que busca un grado de deterioro para un daño específico y le otorga la calificación correspondiente al criterio expresado en la Ecuación 4.17:

$$Cal.Parcial = Buscar(\% \text{ de deterioro } [Ahuellamiento]; \text{tabla referencia}) \quad (4.17)$$

El valor de la parte superior corresponde a la multiplicación de la calificación encontrada anteriormente por los pesos mostrados para cada tipo de deterioro. Lo anterior se muestra en la Ecuación 4.18 que se presenta a continuación:

$$Cal.Ponderada = Calificacion Parcial \times Peso Ahuellamiento \quad (4.18)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor obtenido en la casilla inferior es de naturaleza numérica. El valor calculado para la casilla superior, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior varía de 0 a 1. El rango de valores posibles para la casilla inferior varía de 0 a 5.

Nombre columna (Atributo): “**Otros daños; Desgaste**” Este valor corresponde a la Calificación parcial y Calificación ponderada que se le da a la vía en estudio respecto al daño de desgaste.

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte inferior corresponde a la calificación dada a una vía según el grado de deterioro de esta. Esta calificación se encuentra en una tabla adjunta al documento. Se emplea un buscador que busca un grado de deterioro para un daño específico y le otorga la calificación correspondiente al criterio expresado en la Ecuación 4.19:

$$Cal. Parcial = Buscar(\% \text{ de deterioro } [desgaste]; \text{tabla referencia}) \quad (4.19)$$

El valor de la parte superior corresponde a la multiplicación de la calificación encontrada anteriormente por los pesos mostrados para cada tipo de deterioro. Lo anterior se muestra en la Ecuación 4.20 que se presenta a continuación:

$$Cal. Ponderada = Calificacion Parcial \times Peso desgaste \quad (4.20)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor obtenido en la casilla inferior es de naturaleza numérica. El valor calculado para la casilla superior, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior varía de 0 a 1. El rango de valores posibles para la casilla inferior varía de 0 a 5.

Nombre columna (Atributo): “**Bermas**” Este valor corresponde a la Calificación parcial y Calificación ponderada que se le da a la vía en estudio respecto al daño de desgaste.

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte inferior corresponde a la calificación dada a una vía según el grado de deterioro de esta. Esta calificación se encuentra en una tabla adjunta al documento. Se emplea un buscador que busca un grado de deterioro para un daño específico y le otorga la calificación correspondiente al criterio expresado en la Ecuación 4.21:

$$Cal. Parcial = Buscar(\% de deterioro [Bermas]; tabla referencia) \quad (4.21)$$

El valor de la parte superior corresponde a la multiplicación de la calificación encontrada anteriormente por los pesos mostrados para cada tipo de deterioro. Lo anterior se muestra en la Ecuación 4.22 que se presenta a continuación:

$$Cal. Ponderada = Calificacion Parcial \times Peso Bermas \quad (4.22)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor obtenido en la casilla inferior es de naturaleza numérica. El valor calculado para la casilla superior, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior varía de 0 a 1. El rango de valores posibles para la casilla inferior varía de 0 a 5.

Subcategoría: Drenajes y Zonas laterales

Nombre columna (Atributo): “**Drenajes y Zonas Laterales**”. Esta columna se subdivide en dos columnas con los criterios de Funcionalidad y Suficiencia. Este valor corresponde a la Calificación parcial y Calificación ponderada que se le da a la vía en estudio. Esta sección del formato de evaluación del Criterio Técnico se aprecia en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente al “Drenaje y Zonas Laterales”.

Drenajes					Zonas Laterales
Calificación Parcial / Calificación Ponderada					Calificación Parcial y Ponderada
Cunetas		Alcantarillas		Puentes y Pontones	
Funcionalidad	Suficiencia	Funcionalidad	Suficiencia	Estado	Taludes
2,250%	1,500%	2,625%	1,125%	0,000%	5,0%
1,875%	1,500%	1,875%	1,125%	1,125%	
0,00000	0,00000	0,05625	0,04500	0,04275	0,00000
0	0	3	4	3,8	0
0,00000	0,00000	0,10500	0,05625	0,00000	0,00000
0	0	4	5	0	0

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte inferior corresponde a la calificación dada a una vía según el grado de deterioro de esta. Esta calificación depende del criterio del Administrador Vial y no posee tabla de referencia. El valor de la parte superior corresponde a un condicional que pregunta por la existencia o no de la estructura. Si esta existe, entonces procede a la multiplicación de la calificación encontrada anteriormente por los pesos mostrados para cada tipo de deterioro. Lo anterior se muestra en las Ecuaciones 4.23 y 4.24 que se presentan a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Cal. Pond. Funcionalidad} \\ = \text{Calificación Parcial} \times \text{Funcionalidad (con o sin puente)} \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} \text{Cal. Pond. Suficiencia} \\ = \text{Calificación Parcial} \times \text{Suficiencia (con o sin puente)} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor obtenido en la casilla inferior es de naturaleza numérica. El valor calculado para la casilla superior, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior varía de 0 a 1. El rango de valores posibles para la casilla inferior varía de 0 a 5.

Nombre columna (Atributo): “**Alcantarillas**”. Esta columna se subdivide en dos columnas con los criterios de Funcionalidad y Suficiencia. Este valor corresponde a la Calificación parcial y Calificación ponderada que se le da a la vía en estudio.

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte inferior corresponde a la calificación dada a una vía según el grado de deterioro de esta. Esta calificación depende del criterio del Administrador Vial y no posee tabla de referencia. El valor de la parte superior corresponde a un condicional que pregunta por la existencia o no de la estructura. Si esta existe, entonces procede a la multiplicación de la calificación encontrada anteriormente por los pesos mostrados para cada tipo de deterioro. Lo anterior se muestra en las Ecuaciones 4.25 y 4.26 que se presentan a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Cal. Pond. Funcionalidad} \\ = \text{Calificación Parcial} \times \text{Funcionalidad (con o sin puente)} \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} \text{Cal. Pond. Suficiencia} \\ = \text{Calificación Parcial} \times \text{Suficiencia (con o sin puente)} \end{aligned} \quad (4.26)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor obtenido en la casilla inferior es de naturaleza numérica. El valor calculado para la casilla superior, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior varía de 0 a 1. El rango de valores posibles para la casilla inferior varía de 0 a 5.

Nombre columna (Atributo): “**Puentes y Pontones**” Este valor corresponde a la Calificación parcial y Calificación ponderada que se le da a la vía en estudio.

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte inferior corresponde a la calificación dada a una vía según el grado de deterioro de esta. Esta calificación depende del criterio del Administrador Vial y no posee tabla de referencia. El valor de la parte superior corresponde a un condicional que pregunta por la existencia o no de la estructura. Si esta existe, entonces procede a la multiplicación de la calificación encontrada anteriormente por los pesos mostrados para cada tipo de deterioro. Lo anterior se muestra en la Ecuación 4.27 que se presenta a continuación:

$$Cal. Ponderada = Calificacion Parcial \times Peso Puentes y Pontones \quad (4.27)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor obtenido en la casilla inferior es de naturaleza numérica. El valor calculado para la casilla superior, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior varía de 0 a 1. El rango de valores posibles para la casilla inferior varía de 0 a 5.

Nombre columna (Atributo): “**Zonas laterales**” Este valor corresponde a la Calificación parcial y Calificación ponderada que se le da a la vía en estudio respecto al daño de desgaste.

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte inferior corresponde a la calificación dada a una vía según el grado de deterioro de esta. Esta calificación depende del criterio del Administrador Vial y no posee tabla de referencia. El valor de la parte superior corresponde a un condicional que pregunta por la existencia o no de la estructura. Si esta existe, entonces procede a la multiplicación de la calificación encontrada anteriormente por los pesos mostrados para cada tipo de deterioro. Lo anterior se muestra en la Ecuación 4.28 que se presenta a continuación:

$$Cal. Ponderada = Calificacion Parcial \times Peso Zonas laterales \quad (4.28)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor obtenido en la casilla inferior es de naturaleza numérica. El valor calculado para la casilla superior, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior varía de 0 a 1. El rango de valores posibles para la casilla inferior varía de 0 a 5.

Subcategoría: Señalización

Nombre columna (Atributo): “**Vertical**”. Esta columna se subdivide en dos columnas con los criterios de Estado y Suficiencia. Este valor corresponde a la calificación parcial y calificación ponderada que se le da a la vía en estudio. Esta sección del formato de evaluación del Criterio Técnico se aprecia en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente a la “Señalización”.

Señalización			
Calificación Parcial / Calificación Ponderada			
Vertical		Horizontal	
Estado	Suficiencia	Estado	Suficiencia
1,50%	1,50%	2,25%	2,25%
0,03000	0,03000	0,06750	0,09000
2	2	3	4
0,03000	0,01500	0,00000	0,00000
2	1	0	0
0,03000	0,00000	0,09000	0,04500
2	0	4	2

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte inferior corresponde a la calificación dada a una vía según el grado de deterioro de esta. Esta calificación depende del criterio del Administrador Vial y no posee tabla de referencia. El valor de la parte superior corresponde a un condicional que pregunta por la existencia o no de la estructura. Si esta existe, entonces procede a la multiplicación de la calificación encontrada anteriormente por los pesos mostrados para cada tipo de deterioro. Lo anterior se muestra en la Ecuaciones 4.29 y 4.30 que se presentan a continuación:

$$Cal. Pond. Estado = Calificación Parcial \times Estado \quad (4.29)$$

$$Cal. Pond. Suficiencia = Calificación Parcial \times Suficiencia \quad (4.30)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor obtenido en la casilla inferior es de naturaleza numérica. El valor calculado para la casilla superior, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior varía de 0 a 1. El rango de valores posibles para la casilla inferior varía de 0 a 5.

Nombre columna (Atributo): “**Horizontal**”. Esta columna se subdivide en dos columnas con los criterios de Estado y Suficiencia. Este valor corresponde a la Calificación parcial y Calificación ponderada que se le da a la vía en estudio.

Valor que almacena o fórmula (describa breve mente la fórmula): Esta columna presenta dos datos, uno arriba y otro abajo para un mismo segmento de vía. El dato de la parte inferior corresponde a la calificación dada a una vía según el grado de deterioro de esta. Esta calificación depende del criterio del Administrador Vial y no posee tabla de referencia. El valor de la parte superior corresponde a un condicional que pregunta por la existencia o no de la estructura. Si esta existe, entonces procede a la multiplicación de la calificación encontrada anteriormente por los pesos mostrados para cada tipo de deterioro. Lo anterior se muestra en la Ecuaciones 4.31 y 4.32 que se presentan a continuación:

$$Cal. Pond. Estado = Calificacion Parcial \times Estado \quad (4.31)$$

$$Cal. Pond. Suficiencia = Calificacion Parcial \times Suficiencia \quad (4.32)$$

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor obtenido en la casilla inferior es de naturaleza numérica. El valor calculado para la casilla superior, también es de naturaleza numérica.

Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla superior varía de 0 a 1. El rango de valores posibles para la casilla inferior varía de 0 a 5.

Subcategoría; Calificación Total de la sección

Nombre columna (Atributo): “**Calificación total de la Sección**”. Esta columna se subdivide en dos columnas resultantes, una es cuantitativa y la otra es cualitativa. Este valor corresponde a los consolidados de la Calificación ponderada que se le da a la vía en estudio. Esta sección del formato de evaluación del Criterio Técnico se aprecia en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13: Sección del formato de Criterio Técnico correspondiente a la “Calificación Total de la Sección” o Índice de Estado Superficial (ISE).

Calificación Total de la Sección	
100,0%	Estado

3,70	Regular
3,84	Regular
3,33	Malo

Valor que almacena o fórmula (descripción breve de la fórmula): Para la determinación de la calificación cuantitativa consolidadas se procede a la sumatoria y redondeo de las calificaciones parciales de los diferentes tipos de deterioros. Para el cálculo de la calificación cualitativa definitiva se tuvo en cuenta el siguiente criterio mostrado en la Tabla 4.14:

Tabla 4.14: Categorización del ISE calculado por el Criterio Técnico según INVIA.

Calificación Cuantitativa	Calificación Cualitativa
≤ 2	Muy malo
Entre 2 y 3.5	Malo
Entre 3.5 y 4	Regular
Entre 4 y 4.5	Bueno
Entre 4.5 y 5	Muy Bueno

Tipos de datos que almacena (numéricos, carácter): El valor obtenido en la casilla Cualitativa es un dato de tipo numérico, mientras que el valor obtenido en la casilla Cuantitativa es de tipo carácter o categórico.

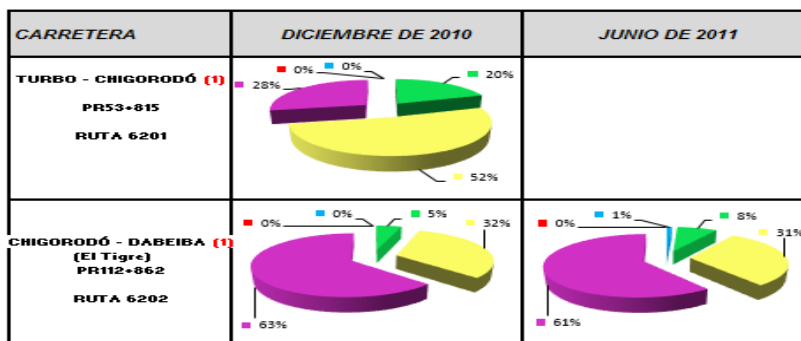
Rango datos soportados (por ejemplo, recibe valores entre 0...1): El rango de valores posibles para la casilla Cuantitativa varía de 0 a 5. El rango de valores posibles para la casilla Cualitativa presenta las categorías, en orden, de: Muy malo, Malo, Regular, Bueno y Muy Bueno.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS
DIRECCION TERRITORIAL ANTIOQUIA

ESTADO DE LAS VIAS (EN TORTA) CRITERIO TECNICO

INGENIERO RESIDENTE ALONSO CARDONA PEREIRA

PERIODO EVALUADO: ENERO-JUNIO DE 2011



CONVENCIONES	
MUY BUENO	
BUENO	
REGULAR	
MALO	
MUY MALO	

Figura 4.2: Formato de presentación grafica de la distribución porcentual del estado de una vía.

-Criterios de calificación: Consiste en la definición de los umbrales para la categorización del valor del ISE. Ver Tabla 4.15.

-Comentarios: Se mencionan observaciones y recomendaciones hacia el INVIAS referentes a actividades de mantenimiento preventivo o correctivo sobre los tramos de vía.

Tabla 4.15: Criterios de ponderación del estado según el área afectada por cada tipo de deterioro.
Fuente: INVIAS.

1. PARÁMETRO		2. FACTOR DE PONDERACIÓN		3. ÁREA DAÑADA (%)	4. CALIFICACIÓN PARCIAL
CALZADA	BACHES	20.00%		0 0.1 - 5.0 5.1 - 10.0 10.1 - 15.0 mayor a 15.0	5.00 3.80 3.00 2.50 1.00
	FISURAS	12.00%		0 0.1 - 5.0 5.1 - 10.0 10.1 - 15.0 mayor a 15.0	5.00 3.80 3.00 2.50 1.00
	DEFORMACIONES (Asentamientos, abultamientos, media luna, desplazamiento de borde, depresiones o hundimientos)	16.00%		0 0.1 - 5.0 5.1 - 10.0 10.1 - 20.0 mayor a 20.0	5.00 3.80 3.00 2.50 1.00
	DESPRENDIMIENTOS (Descascaramiento, pérdida de ligante, pérdida de agregados, Desprendimiento de borde)	8.00%		0 0.1 - 5.0 5.1 - 10.0 10.1 - 20.0 mayor a 20.0	5.00 3.80 3.00 1.50 0.00
	AHUELLAMIENTO	8.00%		Ahuellamiento promedio (mm) 0 0.1 - 5.0 5.1 - 20.0 20.1 - 40.0 mayor a 40.0	5.00 4.50 3.50 2.00 0.00
	OTROS DAÑOS (Cabezas duras, pulimento, exudación, afloramiento)	8.00%		0 0.1 - 5.0 5.1 - 10.0 10.1 - 25.0 mayor a 25.0	5.00 3.75 3.50 2.50 0.00
BERMAS	DAÑOS TOTALES	8.00%		0 0.1 - 5.0 5.1 - 10.0 10.1 - 15.0 mayor a 15.0	5.00 3.80 1.30 0.60 0.00
DRENAJES	CUNETAS	Funcionalidad	2.25%	NOTA: Si no existen bermas o no están pavimentadas, la calificación será la mínima (0)	
		Suficiencia	1.50%		
	ALCANTARILLAS	Funcionalidad	2.63%		
		Suficiencia	1.13%		
ZONAS LATERALES	TALUDES INESTABLES	5.00%			
SEÑALIZACIÓN	VERTICAL	Estado	1.50%		
		Suficiencia	1.50%		
	HORIZONTAL	Estado	2.25%		
		Suficiencia	2.25%		

5. SISTEMAS DE GESTION DE PAVIMENTO

5.1. GENERALIDADES

Los Sistemas de Gestión de Pavimentos (SGP) o PMS, por las siglas en inglés para Pavement Management Systems, surgen como una herramienta que permite establecer una priorización de inversiones para lograr maximizar los beneficios y minimizar los costos asociados con el mantenimiento y rehabilitación de una red de infraestructura Vial, con el fin de mantener los pavimentos de las carreteras que conforman la red vial con un nivel de serviciabilidad adecuado durante su vida útil.

Las mediciones de rendimiento de los pavimentos y los modelos de deterioro son componentes esenciales de un sistema de gestión de pavimento. Esto debido a que la efectividad de la toma de decisiones asociadas con la programación de actividades de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos, dependen directamente de que tan acertadas son las predicciones de rendimiento y deterioro de los mismos, es decir, entre mejor se ajusten dichos modelos, más ajustadas serán las predicciones, lo que permite definir las medidas o estrategias de mantenimiento más adecuadas garantizando una optimización de los recursos.

Para comprender en profundidad el proceso de gestión de pavimentos hay que conocer claramente lo que se denomina como el ciclo de vida del pavimento. El ciclo de vida de un pavimento involucra diversas etapas:

- ✓ Planificación.
- ✓ Diseño.
- ✓ Construcción.
- ✓ Mantenimiento y conservación.
 - Cambios en la condición del pavimento durante el paso del tiempo.
 - Incidencia del mantenimiento en el proceso de cambio del pavimento.

Además, son muchas las variables o factores que inciden en el ciclo de vida de un pavimento, acortándolo o prolongándolo, como el tránsito, el clima, la edad, la integridad estructural, el drenaje, procesos de construcción y las medidas de mantenimiento.

El pavimento puede sufrir diferentes tipos o clases de deterioros, por los factores previamente mencionados, dependiendo del tipo de pavimento:

- Deterioros en Pavimentos Rígidos:
 - Defectos superficiales
 - Agrietamientos
 - Deterioro de las juntas
- Deterioros de Pavimentos Flexibles:
 - Defectos superficiales
 - Deformaciones superficiales
 - Agrietamientos

Dentro del ciclo de vida de un pavimento se pueden identificar diversas etapas o fases que se presentan a continuación:

- **FASE A – Construcción:** Se trata del resultado del proceso de construcción de un pavimento, en esta etapa la vía se encuentra en excelentes condiciones de manera que satisface completamente las necesidades de sus usuarios.
- **FASE B – Deterioro lento y poco visible:** Hace referencia a aproximadamente los primeros 10 años del ciclo de vida de un pavimento. Durante este tiempo el pavimento presenta daños leves en la superficie de rodadura y muy ligeramente se verán afectadas las otras capas restantes de la estructura del pavimento. Para que esta fase cumpla con el tiempo previamente establecido, se necesita de un mantenimiento adecuado.
- **FASE C – Deterioro acelerado:**
 - **Fase C1:** Durante este periodo de la Fase C, el pavimento da la apariencia de no presentar mayores daños.
 - **Fase C2:** En este periodo se da un daño acelerado de la capa de rodadura y de los otros componentes estructurales del pavimento.
- **FASE D – Deterioro generalizado:** En esta etapa final del ciclo de vida se presenta Desprendimiento gradual del pavimento, por sus condiciones la velocidad y capacidad de circulación en la vía disminuye, aumenta tanto el número de accidentes como el costo de operación vehicular.

Lo anteriormente expuesto se puede apreciar en la Figura 5.1.

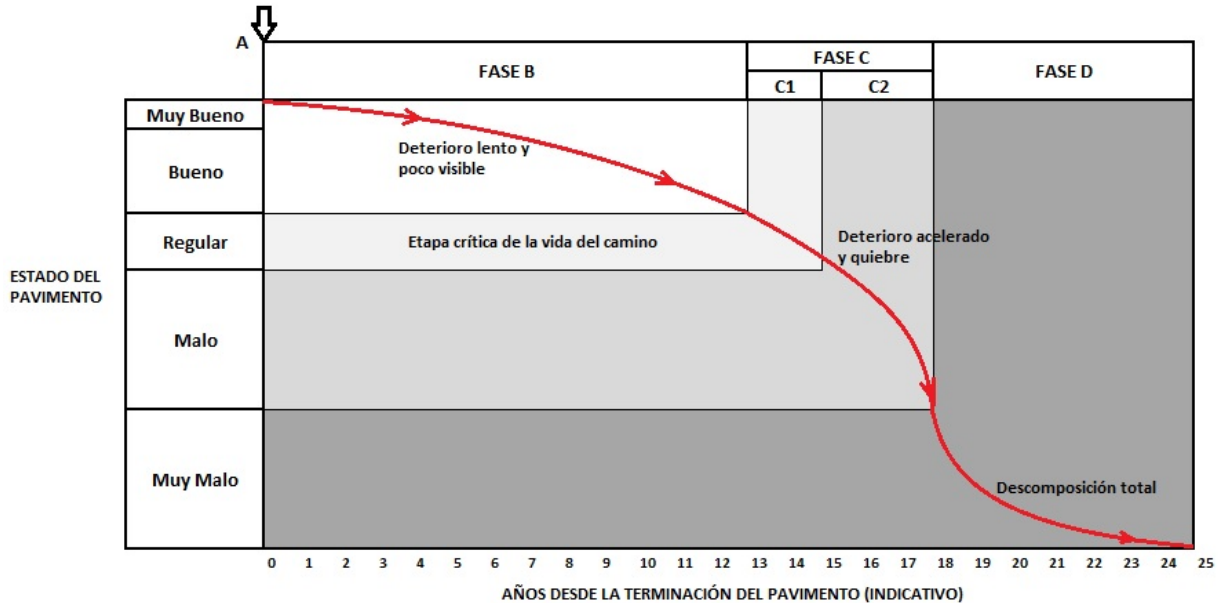


Figura 5.1: Ciclo de vida de un pavimento con sus respectivas fases.

Cabe resaltar que el ciclo de vida de un pavimento está estrechamente relacionado con lo adecuadas y pertinentes que sean las diversas actividades de mantenimiento y rehabilitación al que este sea sometido a medida que presente deterioros. Actividades de mantenimiento inadecuadas desencadenaran en un deterioro acelerado de las condiciones del pavimento, mientras que actividades de mantenimiento adecuadas y oportunas benefician el ciclo de vida de un pavimento. Lo anterior se puede esquematizar de la forma como se muestra en la Figura 5.2.

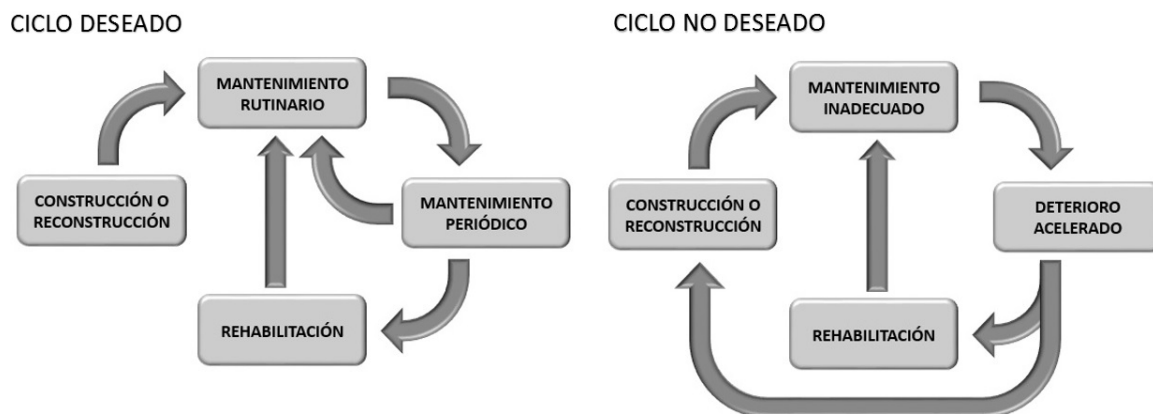


Figura 5.2: Descripción del ciclo deseado y no deseado en un sistema de gestión de pavimentos.

Un Sistema de Gestión de Pavimento (PMS) se materializa a través de un conjunto de herramientas y métodos para la gestión eficaz de la infraestructura vial. Se desarrolla para satisfacer las necesidades no sólo de los entes gubernamentales, sino también de los ciudadanos. Con el fin de ilustrar diferentes niveles de usuarios, se ha propuesto una estructura jerárquica del PMS como se observa en la Figura 5.3 (Haas et al., 1994). La estructura jerárquica consta de tres niveles. El primer nivel es un nivel administrativo el cual se encarga de la asignación de los fondos entre las diferentes categorías de la infraestructura de transporte. A nivel de red, los organismos de gestión de pavimentos determinan las estrategias de mantenimiento y rehabilitación, identifican los lugares correspondientes para aplicarlas, y programan su ejecución. Con base en los resultados de la identificación óptima de prioridades, se asignan los recursos necesarios para la intervención de la infraestructura vial. Las actividades detalladas de mantenimiento y rehabilitación se tratan a nivel de proyecto.

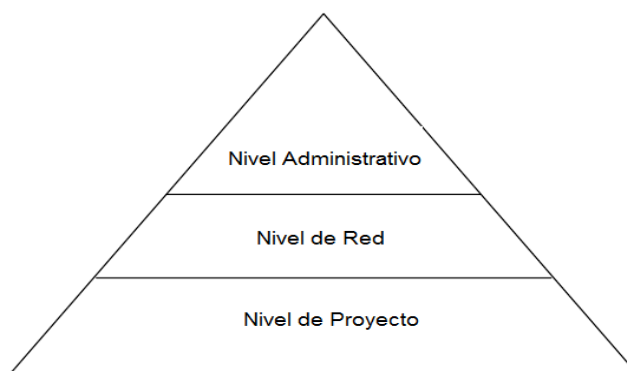


Figura 5.3: Estructura jerárquica de un Sistema de Gestión de Pavimento.

Sin importar en qué nivel, el objetivo de un PMS es ayudar a las agencias viales a proporcionar una alta calidad y un servicio rentable para los usuarios de las vías del país. Todo sistema de gestión de pavimentos involucra tres componentes esenciales que se interrelacionan (USDOT y FHWA, 1999). Dichos componentes son:

1. Base de Datos: Es sumamente importante que los sistemas de gestión estén fundamentados en una serie de datos confiables que permitan evaluar el rendimiento o comportamiento real de los pavimentos. La base de datos estará comprendida por parámetros funcionales y estructurales del pavimento como medidas de rugosidad, deflexiones, número estructural, espesores de las capas del pavimento, inventario de daños, entre otros.

2. **Análisis:** Se trata del proceso de evaluación y análisis de los datos previamente suministrados con el fin de generar los productos necesarios que fundamenten la toma de decisiones en cuanto a las actividades de mantenimiento y rehabilitación a implementar.
3. **Proceso de Retroalimentación:** Una vez implementadas las actividades necesarias de mantenimiento y rehabilitación se deben monitorear los resultados con el fin de actualizar la base de datos y aumentar la precisión del proceso de análisis.

Los datos y la información juegan un papel importante en el sistema, porque los buenos sistemas de gestión deben ser construidos sobre información confiable. Los datos de las condiciones medidas se pueden utilizar para evaluar el comportamiento real de los pavimentos, para predecir la tasa de deterioro de la red vial y la eficacia de las acciones de mantenimiento, y para priorizar aún más los proyectos de manera rentable basados en el estado actual, las tendencias proyectadas, el crecimiento económico y los recursos disponibles. Todo esto constituye el núcleo analítico del PMS. Después de la implementación de las acciones de mantenimiento y rehabilitación, no se debe ignorar el monitoreo del desempeño de los tramos intervenidos, con el fin de actualizar y retroalimentar la base de datos de análisis del sistema. Los puntos anteriores se integran como se muestra en la Figura 5.4:

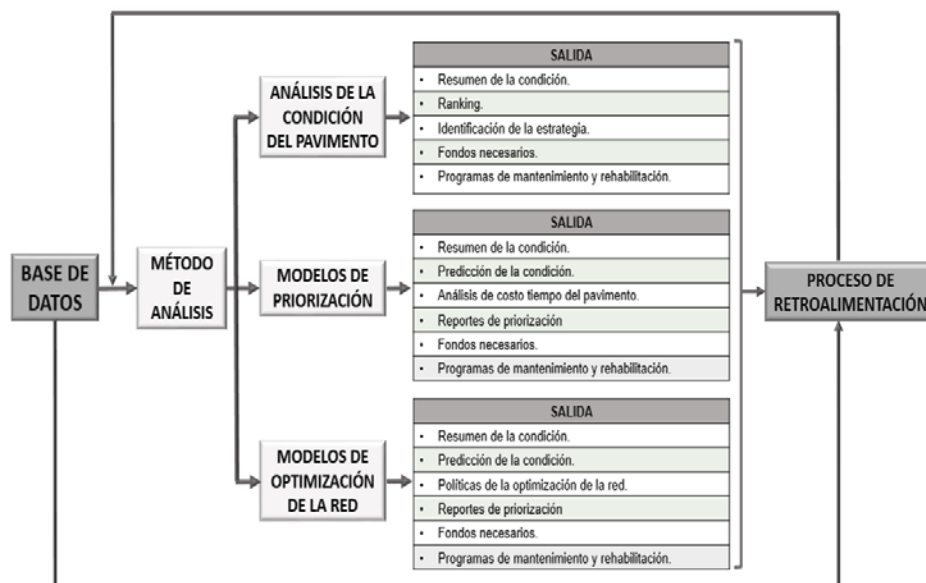


Figura 5.4: Componentes esenciales de todo sistema de gestión de pavimentos.

La Figura 5.4 detalla tres niveles o grados de complejidad que se pueden presentar dentro de un sistema de gestión de pavimentos según el método de análisis utilizado:

1. Análisis de la condición del pavimento: En este tipo de análisis se estima el estado o condición de la red vial con base en la condición actual que presenta el pavimento. Es un tipo de análisis que no tiene capacidad de predecir cómo evolucionará con el paso del tiempo dicha condición. Por esta razón, a este nivel no se requiere la implementación de mayores herramientas tecnológicas o modelos de predicción.

El objetivo de esta etapa implica obtener un índice o puntaje ponderado que evalúe la condición actual que presenta el pavimento con base en diferentes datos o mediciones que representan el estado del pavimento considerando múltiples tipos de fallas. Este tipo de análisis involucra diversos pasos entre los que se destacan:

- Evaluación de la condición de los diversos tramos de pavimento que componen la red vial en función de los diferentes tipos de daños y clasificación según la condición e importancia del tramo.
- Identificación de las estrategias o medidas pertinentes de mantenimiento o rehabilitación según la condición específica de cada uno de los tramos de pavimento.
- Cálculo del presupuesto necesario para adelantar las labores de mantenimiento o rehabilitación requeridas por cada uno de los tramos. En caso de no contar con los fondos suficientes para realizar todas las medidas requeridas, se priorizarán las actividades en función de la clasificación previamente elaborada.
- Una vez definidas cuales son las medidas pertinentes para cada tramo y conociendo el presupuesto disponible, se procede a realizar las diversas labores de mantenimiento o rehabilitación.

2. Modelos de priorización: Es un método de análisis que no se trabaja únicamente con la condición actual del pavimento, sino que permite predecir

cómo va a variar la condición de este a lo largo del tiempo mediante la implementación de modelos de predicción que pueden estimar dicho comportamiento. Esta metodología utiliza herramientas un poco más complejas como por ejemplo análisis de costo – tiempo o ciclo de vida del pavimento. Todo esto con el objetivo de establecer una lista de las diversas alternativas de mantenimiento o rehabilitación para los diversos tramos de pavimento, estableciendo claramente un orden en función de su importancia. Ante el eventual caso de no tener los recursos suficientes para adelantar todas las medidas de mantenimiento o rehabilitación necesarias, se ejecutarán las actividades que encabezan la lista por orden de importancia. Este tipo de enfoque involucra diversos pasos entre los que se destacan:

- Evaluación de la condición de los diversos tramos de pavimento y predicción de la evolución de dichas condiciones.
 - Establecer las actividades de mantenimiento o rehabilitación pertinentes para cada tramo mediante análisis costo-ciclo de vida.
 - Elaboración de un listado donde se priorizan los proyectos que requieren actividades de mantenimiento y rehabilitación según el orden un orden de importancia establecido.
 - Cálculo del presupuesto necesario para adelantar las labores de mantenimiento o rehabilitación requeridas por cada uno de los tramos. En caso de no contar con los fondos suficientes para realizar todas las medidas requeridas, se priorizarán las actividades en función de la clasificación previamente elaborada.
 - Se procede a planear, programar y ejecutar las diversas labores de mantenimiento o rehabilitación necesarias.
3. Modelos de optimización de la red: Este tipo de análisis se caracteriza por permitir optimizar de manera conjunta todos los tramos que componen la red vial, es decir, este tipo de análisis evalúa el desempeño general de la red durante un periodo de tiempo determinado con el objetivo de identificar las medidas de mantenimiento y/o rehabilitación necesarias, con el fin de obtener

el mayor beneficio posible, conservando niveles generales de serviciabilidad adecuados y ajustándose al presupuesto disponible. Se asemeja mucho a los modelos de priorización con la ventaja de poder evaluar gran número de combinaciones de estrategias de mantenimiento y rehabilitación para cada uno de los tramos, con el objetivo de maximizar el desempeño de la red y minimizar el costo de las inversiones. Este tipo de análisis involucra diversos pasos entre los que se destacan:

- Evaluación y predicción de la condición general de la red.
- Establecer las medidas de mantenimiento o rehabilitación pertinentes que optimicen el desempeño general de la red.
- Cálculo del presupuesto necesario para adelantar las actividades de mantenimiento o rehabilitación requeridas.
- Planeación, programación y ejecución de las diversas actividades de mantenimiento o rehabilitación seleccionadas.

La Figura 5.5 al igual que la Figura 5.4, también representa todos los componentes y el proceso de desarrollo de un sistema de gestión de pavimentos, pero considera un nivel de detalle más amplio. Entre los aspectos más importantes a destacar se encuentra el hecho de que el conjunto de datos de entrada o base de datos puede ser alimentado por parámetros y mediciones de diferente naturaleza como es el caso de datos representativos de las condiciones medio ambientales o de las solicitudes de tránsito y carga a las que estará sometido el pavimento, entre otros. Además, se puede evidenciar como después de todo el proceso que incluye la modelación, el diseño, la optimización e implementación y construcción del pavimento, es sumamente importante implementar herramientas que permitan monitorear el rendimiento o desempeño del mismo, ya que esta es la fuente de datos más importante y apropiada para la retroalimentación del sistema (Ver Figura 5.5).

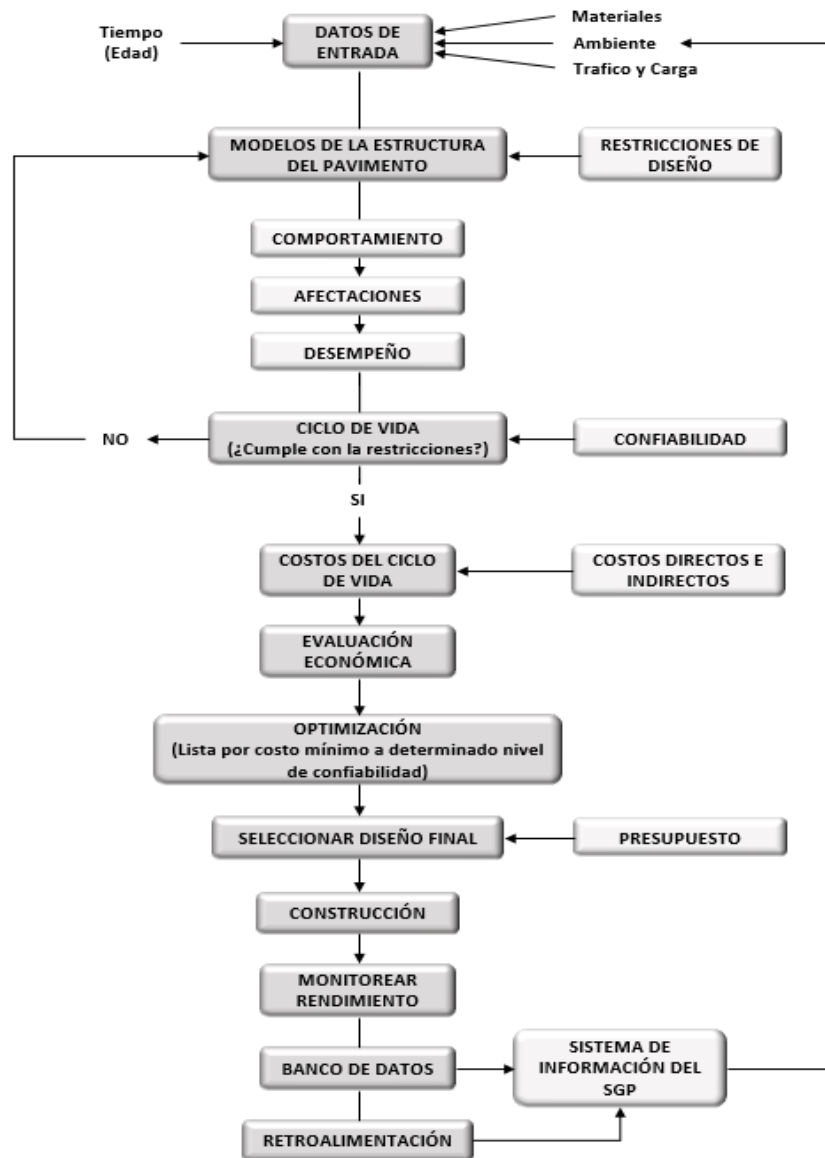


Figura 5.5: Ciclo y etapas convencionales de todo sistema de gestión de pavimentos según el Construction Specifications Institute (CSI, 2002).

5.2. TIPOS DE DAÑOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

Existen varias causas que pueden dar origen a los diversos tipos de daños que se pueden presentar en un pavimento flexible, de todas las causas posibles hay cuatro que son los más predominantes:

1. El tránsito de vehículos pesados sobre la estructura de pavimento.
2. El clima de la zona donde se encuentra el pavimento, esto es, humedad precipitaciones y cambios de temperatura.
3. Mala calidad de las mezclas asfálticas.
4. Proceso constructivo inadecuado.

Los tipos de deterioros que se presentan en un pavimento flexible pueden clasificarse en dos categorías según el tipo de daños:

1. Daños Funcionales: En esta categoría clasifican todos los deterioros que afectan directamente la integridad de la carpeta asfáltica.
2. Daños Estructurales: Clasifican aquellos tipos de daños que además de afectar la primera capa de la estructura de pavimento, comprometen la integridad estructural de las capas adyacentes a ésta.

5.2.1. Daños Funcionales En Pavimentos Flexibles

Según el tipo de daño que experimente la superficie del pavimento estos se pueden clasificar en 3 categorías:

- Desprendimientos.
- Alisamientos.
- Exposición de agregados.

A continuación, se presentan la descripción de una serie de daños comunes que se presentan en la superficie del pavimento con su respectiva categorización.

Tabla 5.1: Categorización de daños comunes que se presentan en la superficie del pavimento.

TIPO DE DAÑOS	DESCRIPCIÓN
Desprendimientos	Perdida de agregados en tratamientos superficiales.
	Descascaramiento. Pérdida de capa de rodadura (Peladuras).
	Ojo de pescado o bache superficial.
Alisamientos	Exudación de asfalto (Sangrado).
	Pulimiento (Agregados).
Exposición de agregados	Cabeza dura (perdida de película ligante).

5.2.1.1. Pérdida De Agregados En Tratamientos Superficiales

Se trata de un tipo de daño en el cual se presenta pérdida parcial del agregado que hace parte de los tratamientos superficiales, lo cual genera la exposición de algunas zonas o áreas aisladas de la capa de apoyo.



Figura 5.6: Apariencia de un pavimento afectado por pérdida de agregados.

Causas. Entre las posibles causas de este tipo de deterioro se encuentran:

- Uso de ligante asfáltico inadecuado.
- Distribución irregular del ligante asfáltico.
- Utilización de agregados pétreos inadecuados por falta de adherencia (afinidad y/o temperatura) con el ligante asfáltico.
- Utilización de agregados sucios o con polvo adherido.
- Exposición a la lluvia durante el esparcimiento del ligante asfáltico o durante el proceso de fraguado.

Nivel de Severidad. Para clasificar cualitativamente que tan grave es la magnitud de este tipo de daño se tienen que evaluar la relación entre cual es el área de afectación, es decir, el área que presenta pérdida o Desprendimiento de agregados de los tratamientos superficiales, con respecto al área del tramo evaluado.

Dependiendo de dicha relación, los daños presentados se podrán clasificar en 3 niveles de severidad:

- Bajo: Se trata de una pérdida aislada de los agregados que componen el tratamiento superficial.
- Medio: Hace referencia a una pérdida continua de los agregados.

- Alto: Se registra una pérdida generalizada de los agregados en el tramo evaluado.

Método de Evaluación. Se registra el área afectada por este daño con respecto al área total evaluada, en tramos de 100 metros por carril de circulación.

Medida de Intervención Recomendada. Con el objetivo de reparar las condiciones presentadas se pueden tomar diversas medidas según el nivel de severidad del daño. Para un nivel de severidad bajo se recomienda realizar labores de riego en negro, mientras que para niveles de severidad medio y alto se recomienda aplicar un tratamiento superficial simple. Finalmente, si el porcentaje de área afectada es superior al 5% del área total se recomienda adelantar medidas de parcheo.

- Riego en negro: Se trata de la ligera aplicación de emulsión asfáltica diluida sobre aquella superficie del pavimento que presenta la pérdida de agregados, de esta manera se protege la superficie creando una barrera impermeable.
- Tratamiento superficial simple: Se hacen aplicaciones consecutivas de emulsión asfáltica de rotura rápida y capas de gravilla uniforme, su función al utilizarse sobre un pavimento existente es mejorar características como el drenaje, la fricción y crear una barrera impermeabilizante que proteja las otras capas estructurales que componen el pavimento.

5.2.1.2. Descascaramiento: Pérdida de capa de rodadura

Se trata de un tipo de daño en el que se presenta Desprendimiento de la última capa delgada de los tratamientos superficiales, tales como: Lechadas o Mezclas arena-asfalto (Microcarpetas, capas de rodadura, sobrecapas o sobrecarpetas).



Figura 5.7: Apariencia de un pavimento afectado por descascaramiento.

Causas. Entre las posibles causas de este tipo de daño en específico se encuentran:

- Limpieza inadecuada de la superficie antes de la aplicación del tratamiento superficial.
- Utilización de ligante asfáltico inadecuado.
- Dosificación equivocada del ligante asfáltico y los agregados pétreos.
- Falta de homogenización en la distribución del ligante asfáltico.
- Aplicación de la capa de tratamiento superficial, ante la presencia de lluvia o con exceso de agua en la superficie de la capa de apoyo, lo que puede desencadenar en deslaminación.
- Envejecimiento del ligante asfáltico.

Nivel de Severidad. Para clasificar cualitativamente que tan grave es la magnitud de este tipo de daño se tienen que medir la profundidad y el área de los Desprendimientos.

Dependiendo de dichas mediciones, este tipo de daño se podrá clasificar en 3 niveles de severidad:

- Bajo: Cuando la profundidad del descascaramiento es menor a 25 mm y el área de estos es menor a 0,8 m².
- Medio: La profundidad del descascaramiento es menor a 25 mm y el área mayor a 0,8 m² o cuando el descascaramiento tiene más de 25 mm de profundidad, pero un área menor a 0,8 m².
- Alto: Cuando la profundidad del descascaramiento es mayor a 25 mm y el área es mayor a 0,8 m².

Método de Evaluación. Se mide la proporción del área afectada respecto al área total evaluada, en tramos de 100 m por carril de circulación.

Medida de Intervención Recomendada. Con el objetivo de reparar las condiciones presentadas por este tipo de daño se pueden tomar diversas medidas según el nivel de severidad. Para un nivel de severidad bajo se recomienda realizar parcheo en superficies de rodadura asfáltica o tratamiento superficial simple. Para niveles de

severidad medio o alto se recomienda hacer una renivelación con sobrecarpeta con mezclas asfálticas en frío o en caliente.

- Renivelación con sobrecarpeta: Consiste en aplicar una capa de nivelación colocada directamente sobre el pavimento existente en los puntos donde este presenta grandes Deformaciones y de esta manera poder eliminar desniveles, brindando una capa de rodadura lisa y segura.

5.2.1.3. Ojo De Pescado o Bache Superficial

Hace referencia a un tipo de daño en el que se presenta Desprendimiento del material de la base en la que se apoya la capa de rodadura, una vez que ya se ha perdido ésta última. Puede ocurrir en bases tratadas o no tratadas.

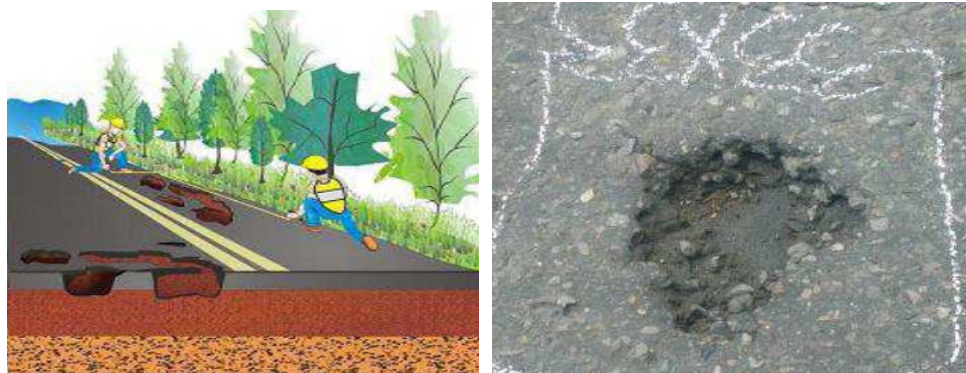


Figura 5.8: Apariencia de un pavimento afectado por Bache superficial.

Causas. Entre las posibles causas de este tipo de deterioro se encuentran:

- Utilización del ligante asfáltico inadecuado o de pobre calidad.
- Espesor insuficiente de la capa de rodadura.
- Dosificación insuficiente del ligante asfáltico en bases tratadas con cemento asfáltico, aplicado en caliente, diluido o emulsificado.
- Penetración insuficiente del riego de imprimación en bases hidráulicas (Menor a 0.5 cm).
- Evolución del daño por piel de cocodrilo (Una clase de daño estructural en pavimentos flexibles) hasta ocasionar pérdida de material y ahuecamiento.

Nivel de Severidad. Para clasificar cualitativamente que tan grave es la magnitud de este tipo de daño se tiene que cuantificar la cantidad de ojos de pescado y el área que estos abarcan.

Dependiendo de dichas mediciones, este tipo de daño se podrá clasificar en 3 niveles de severidad:

- Bajo: Cuando hay menos de 5 ojos de pescado con diámetros menores a 300 mm.
- Medio: Cuando hay entre 5 y 10 ojos de pescado con diámetros menores a 300 mm o cuando hay menos de 5 ojos de pescado con diámetros menores a 1000 mm.
- Alto: Cuando hay más de 10 ojos de pescado de diámetros menores a 300 mm o cuando hay entre 5 y 10 ojos de pescado con diámetros menores a 1000 mm.

Método de Evaluación. Se mide el número de ojos de pescado y su diámetro por cada 100 metros de carril de circulación.

Medida de Intervención Recomendada. Con el objetivo de reparar las condiciones presentadas por este tipo de daño se pueden tomar diversas medidas según el nivel de severidad. Para un nivel de severidad bajo se recomienda adelantar medidas de parcheo en superficies de rodadura asfáltica. Para niveles de severidad medio y alto se recomienda se recomienda hacer bacheo en superficie de rodadura asfáltica, ya sean bases tratadas o no.

5.2.1.4. Exudación Del Asfalto: Sangrado

Este tipo de daño consiste en la presencia superficial de asfalto sin agregados pétreos.



Figura 5.9: Apariencia de un pavimento afectado por exudación del asfalto.

Causas: Entre las posibles causas de este tipo de deterioro se encuentran:

- Dosificación excesiva del ligante asfáltico.
- Uso de un ligante asfáltico demasiado blando.
- Derrame de solventes sobre la superficie del pavimento.

Nivel de Severidad. Para clasificar cualitativamente que tan grave es la magnitud de este tipo de daño se mide que tan perceptible es, ante la vista y el contacto, la presencia excesiva de asfalto y el área que abarca en el pavimento con respecto al tramo evaluado. Dependiendo de esto, el daño se podrá clasificar en 3 niveles de severidad:

- Bajo: Poco visible. El asfalto no se adhiere a los zapatos o a los neumáticos de los vehículos.
- Medio: Visible. El asfalto se adhiere a los zapatos y a los neumáticos de los vehículos durante algunas semanas del año.
- Alto: Abundante. El asfalto se adhiere a los zapatos y a los neumáticos de los vehículos durante un gran número de semanas al año.

Método de Evaluación. Se mide la proporción del área afectada respecto al área total por cada 100 metros de carril de circulación.

Medida de Intervención Recomendada. Para todos los niveles de severidad se recomienda realizar un riego de arena que consiste en extender y compactar una capa de arena sumamente delgada.

5.2.1.5. Pulimento de Agregados

Este tipo de daño consiste en la presencia de agregados pétreos que tienen una cara plana en la superficie del pavimento, generalmente embebidos en el ligante asfáltico.

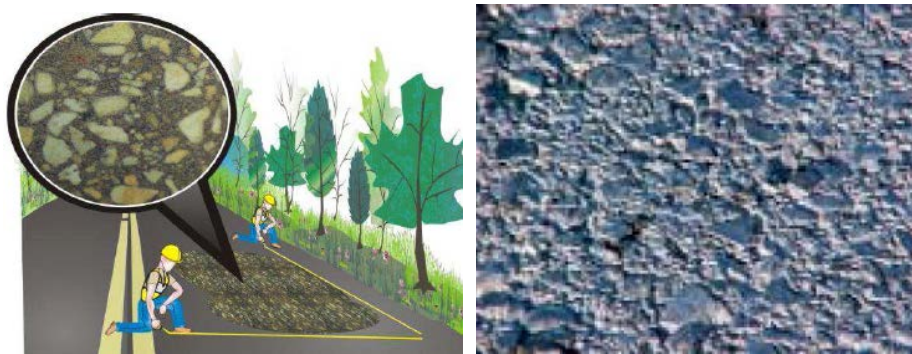


Figura 5.10: Apariencia de un pavimento afectado por Pulimento.

Causas: Uso de agregados pétreos blandos los cuales son susceptibles al pulimento como es el caso de las calizas.

Nivel de Severidad. Para este tipo de daño no se establecen niveles de severidad debido a que es un deterioro que no presenta progresión.

Método de Evaluación. Se mide la proporción del área afectada respecto al área total por cada 100 metros de carril de circulación.

Medida de Intervención Recomendada. Se recomienda aplicar un sello arena-asfalto que consiste en aplicar un material bituminoso sobre la superficie del pavimento, normalmente una emulsión de rotura rápida, seguida de una extensión y compactación de una capa delgada de arena.

5.2.1.6. Cabeza Dura (Pérdida De Película De Ligante)

Se trata de la presencia de agregados pétreos parcialmente expulsados que se encuentran expuestos fuera del concreto asfáltico.

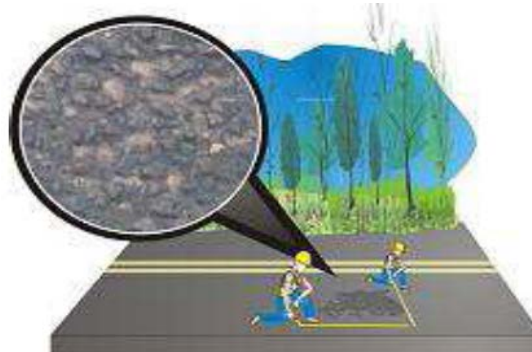


Figura 5.11: Apariencia de un pavimento afectado por Pérdida De Película De Ligante.

Causas. Entre las posibles causas de este tipo de deterioro se encuentran:

- Déficit en la dosificación del ligante asfáltico.
- Utilización de agregados pétreos con tamaños inadecuados y distribución granulométrica deficiente en el rango de las arenas.
- Segregación de los agregados durante el proceso constructivo.

Nivel de Severidad. Para este tipo de daño no se establecen niveles de severidad.

Método de Evaluación. Se mide la proporción del área afectada respecto al área total por cada 100 metros de carril de circulación. Se identifican aquellas áreas donde se evidencie pérdida del ligante asfáltico que recubre a los agregados dejándolos parcialmente expuestos fuera del concreto asfáltico.

Medida de Intervención Recomendada. Se recomienda aplicar una sobrecapa delgada, construida con una mezcla del tipo denso en caliente. Esta sobrecapa extenderá la vida útil del pavimento y aquellos daños superficiales serán recubiertos dando la apariencia de un pavimento nuevo.

5.2.2. Daños Estructurales De Pavimentos Flexibles

Según el tipo de daño estructural que experimente el pavimento estos se pueden clasificar en 2 categorías:

- Deformaciones.
- Agrietamientos.

A continuación, se presentan la descripción de una serie de daños comunes que se presentan en la estructura del pavimento con su respectiva categorización.

Tabla 5.2: Categorización de daños comunes que se presentan en la estructura del pavimento.

TIPO DE DAÑOS	DESCRIPCIÓN
Deformaciones	Ahuellamiento.
	Baches profundos.
	Ondulaciones.
Agrietamientos	Grieta longitudinal.
	Grieta transversal.
	Falla en bloque.
	Piel de cocodrilo.

5.2.2.1. Ahuellamiento

El fenómeno del ahuellamiento se trata de un tipo de deterioro caracterizado por la aparición de una depresión canalizada en la huella de circulación de los vehículos sobre la superficie del pavimento. Normalmente este tipo de deterioro ocurre en pavimentos asfálticos sometidos a una combinación de elevados niveles de tránsito, tráfico pesado y/o lento, y que además presenta altas temperaturas de servicio.



Figura 5.12: Apariencia de un pavimento afectado por Ahuellamiento.

Las Deformaciones que presenta el pavimento asfáltico ante las diferentes sollicitaciones de cargas corresponden a una combinación entre deformación plástica (o viscosa) y elástica. El proceso de deterioro por ahuellamiento se genera producto de que la componente elástica de la deformación se recupera, mientras que la componente plástica se acumula generando las Deformaciones.

Causas. Entre las posibles causas de este tipo de deterioro se encuentran:

- Exposición a altas temperaturas: Las temperaturas altas aumentan la componente plástica de deformación del asfalto.
- Pavimento sometido a cargas pesadas: Las cargas pesadas aumentan la magnitud de las Deformaciones.
- Circulación de vehículos a bajas velocidades: El tráfico lento disminuye la rigidez del asfalto, por lo que aumenta la componente plástica de Deformaciones.
- Falla estructural de la subrasante que se refleja en la superficie del pavimento.

Nivel de Severidad. Para clasificar cualitativamente que tan grave es la magnitud de este tipo de daño se tiene que medir la profundidad de la depresión generada sobre la superficie del pavimento:

- Bajo: Deformaciones con profundidades menores a 20 mm.
- Medio: Deformaciones con profundidades entre los 20 y 40 mm.
- Alto: Deformaciones con profundidades mayores a 40 mm.

Medida de Intervención Recomendada.

- Se recomienda disminuir el contenido de asfalto de las mezclas, mediante el manejo de la granulometría del agregado.
- Diseñar la mezcla con un contenido de vacíos del 5%, para asegurar un comportamiento menos plástico de las mezclas.

Utilización de asfaltos más duros en aquellos proyectos que vayan a estar sometidos a altos niveles de tránsito en climas muy calurosos.

5.2.2.2. Baches Profundos

Es un tipo de daño que consiste en el hundimiento local de la calzada, con agrietamiento en malla cerrada y que generalmente presenta pérdida de bloques de la capa de rodadura.



Figura 5.13: Apariencia de un pavimento afectado por Baches profundos.

Causas. Entre las posibles causas de este tipo de deterioro se encuentran:

- Defectos durante el proceso constructivo.
- Subdrenaje inadecuado.
- Estructura inadecuada.

Nivel de Severidad. Para clasificar cualitativamente que tan grave es la magnitud de este tipo de daño se mide que tan profundo es el bache y cuál es el área de éste respecto al área evaluada.

Dependiendo de dichas mediciones, este tipo de daño se podrá clasificar en 3 niveles de severidad:

- Bajo: El área comprometida es inferior al 1% del área total del tramo evaluado y la profundidad del bache es menor a 2.5 cm.
- Medio: El área comprometida por el bache esta entre el 1% y el 3% del área total del tramo evaluado y la profundidad del bache está entre los 2.5 y 3.5 cm.
- Alto: El área comprometida es mayor al 3% del área total del tramo evaluado y la profundidad del bache es mayor a 3.5 cm.

Método de Evaluación. Se mide la proporción del área afectada respecto al área total por cada 100 metros de carril de circulación, con hundimiento mayor a 2 cm. Se medirá con la ayuda de una regla de 3 metros de longitud, colocada perpendicularmente al eje de la vía.

Medida de Intervención Recomendada. Para niveles de severidad bajo y medio se recomienda adelantar labores de bacheo.

5.2.2.3. Ondulaciones

Es una clase de daño que consiste en la aparición de Deformaciones del perfil longitudinal con crestas y valles regularmente espaciados en tramos cortos. En aquellos puntos donde las ondulaciones son más críticas suelen aparecer grietas semicirculares.

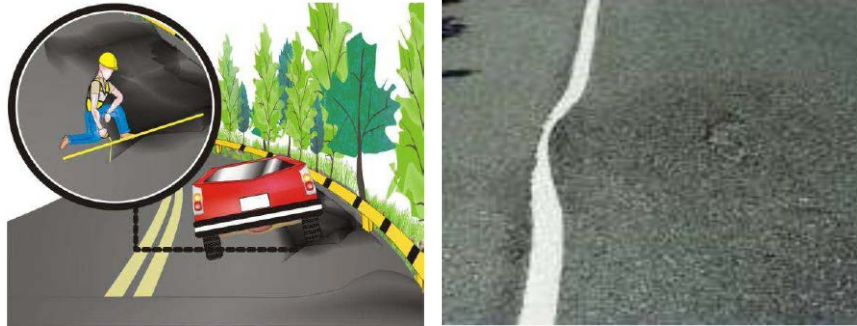


Figura 5.14: Apariencia de un pavimento afectado por Ondulaciones.

Causas. Entre las posibles causas de este tipo de deterioro se encuentran:

- Dosificación inadecuada del ligante asfáltico.
- Utilización de ligantes asfálticos blandos.
- Utilización de agregados pétreos redondeados.
- Frenado de vehículos pesados en intersecciones.
- Circulación lenta en pendientes pronunciadas.

Nivel de Severidad. Para clasificar cualitativamente que tan grave es la magnitud de este tipo de daño se tiene que medir la profundidad de la flecha de la ondulación y el porcentaje de área comprometida con respecto al área total del tramo evaluado.

Dependiendo de dichas mediciones, este tipo de daño se podrá clasificar en 3 niveles de severidad:

- Bajo: La profundidad de la flecha está entre 13 y 25 mm.
- Medio: La profundidad de la flecha está entre 25 y 50 mm.
- Alto: La profundidad de la flecha es mayor a 50 mm.

Método de Evaluación. Se registra la profundidad máxima de los valles, medida a partir de una regla de 3 metros que se coloca longitudinalmente y se mide la proporción del área afectada respecto al área total por cada 100 metros de carril de circulación.

Medida de Intervención Recomendada. Con el objetivo de reparar las condiciones presentadas por este tipo de daño se pueden tomar diversas medidas según el nivel de severidad. Para un nivel de severidad bajo no se requiere intervención alguna. Para niveles de severidad medio y alto, se recomienda realizar una renivelación de la superficie con sobrecarpetas con mezcla asfáltica en caliente o en frío, según la pertinencia del caso.

5.2.2.4. Grieta Longitudinal

Este tipo de daño consiste en la aparición de una rotura longitudinal sensiblemente paralela al eje de la carretera con abertura mayor de 3 mm.

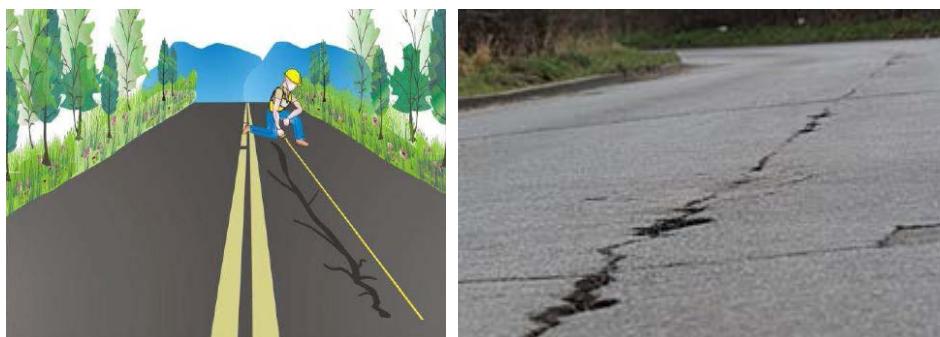


Figura 5.15: Apariencia de un pavimento afectado por grietas longitudinales.

Causas. Entre las posibles causas de este tipo de deterioro se encuentran:

- Juntas de construcción longitudinales trabajadas inadecuadamente.
- Utilización de ligantes asfálticos demasiado duros.
- Utilización de ligantes asfálticos envejecidos.
- Exposición a gradiente térmico superior a 30° C.

Nivel de Severidad. Para clasificar cualitativamente que tan grave es la magnitud de este tipo de daño se tiene que medir el ancho de la grieta. Dependiendo de dicha medición, este tipo de daño se podrá clasificar en 3 niveles de severidad:

- Bajo: Grieta única con ancho menor a 3 mm.
- Medio: Grieta con Desprendimiento y ramificación o grieta fina ramificada con ancho entre 3 y 10 mm.
- Alto: Grieta con Desprendimientos y ramificada con ancho mayor a 10 mm.

Método de Evaluación. Se registra el ancho y la longitud de las grietas por cada 100 metros de carril de circulación.

Medida de Intervención Recomendada. Con el objetivo de reparar las condiciones presentadas por este tipo de daño se pueden tomar diversas medidas según el nivel de severidad. Para un nivel de severidad bajo no se requiere intervención. Para niveles de severidad medio y alto, se realiza un sello de las Fisuras y grietas mediante la aplicación de un producto bituminoso sellante que puede ser en frío o en caliente y cuyas proporciones dependerán de que tan grande es la abertura de la grieta.

5.2.2.5. Grieta Transversal

Este tipo de daño consiste en la aparición de una rotura transversal sensiblemente perpendicular al eje de la vía con abertura mayor de 3 mm.

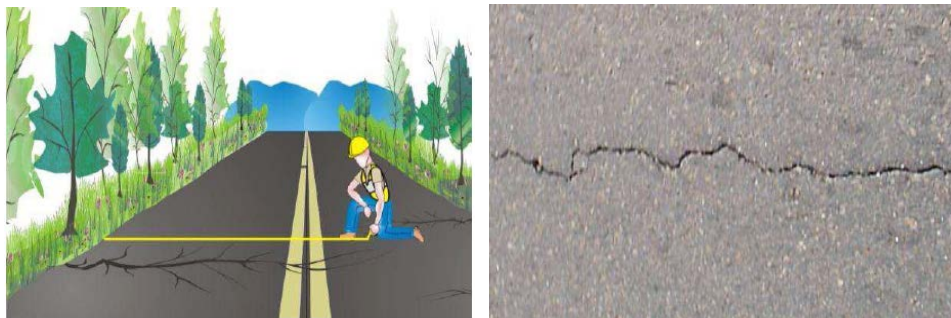


Figura 5.16: Apariencia de un pavimento afectado por Grietas transversales.

Causas. Entre las posibles causas de este tipo de deterioro se encuentran:

- Juntas transversales de construcción que fueron construidas inadecuadamente.
- Utilización de ligantes asfálticos demasiado duros.
- Utilización de ligantes asfálticos envejecidos.
- Exposición a gradiente térmico superior a 30° C.
- Reflejo de grietas en bases rígidas, como losas de concreto hidráulico o bases estabilizadas.

Nivel de Severidad. Para clasificar cualitativamente que tan grave es la magnitud de este tipo de daño se tiene que medir el ancho de la grieta. Dependiendo de dicha medición, este tipo de daño se podrá clasificar en 3 niveles de severidad:

- Bajo: Grieta única con un ancho menor a 3 mm.
- Medio: Grieta con Desprendimiento y ramificación o grieta fina ramificada con ancho entre 3 y 10 mm.
- Alto: Grieta con Desprendimientos y ramificada con ancho mayor a 10 mm.

Método de Evaluación. Se registra el ancho y la longitud de las grietas por cada 100 metros de carril de circulación.

Medida de Intervención Recomendada. Con el objetivo de reparar las condiciones presentadas por este tipo de daño se pueden tomar diversas medidas según el nivel de severidad. Para un nivel de severidad bajo no se requiere intervención. Para niveles de severidad medio y alto, se realiza un sello de las Fisuras y grietas mediante la aplicación de un producto bituminoso sellante que puede ser en frío o en caliente y cuyas proporciones dependerán de que tan grande es la abertura de la grieta.

5.2.2.6. Falla En Bloque

Este tipo de daño consiste en la aparición de una serie de Fisuras que se derivan de una fisura principal, las Fisuras no se cierran para formar polígonos a diferencia de la piel de cocodrilo donde sí se forma una malla cerrada.



Figura 5.17: Apariencia de un pavimento afectado por Falla en bloque.

Causas. Entre las posibles causas de este tipo de deterioro se encuentran:

- Utilización de ligantes asfálticos demasiado duros.
- Reflejo de Fisuras en bases estabilizadas.

Nivel de Severidad. Para clasificar cualitativamente que tan grave es la magnitud de este tipo de daño se tiene que medir el ancho de las Fisuras. Dependiendo de dicha medición, este tipo de daño se podrá clasificar en 3 niveles de severidad:

- Bajo: Fisura única de ancho menor a 3 mm.
- Medio: Grietas múltiples no interconectadas de anchos entre 3 y 10 mm.
- Alto: Grietas múltiples no interconectadas de anchos mayores a 10 mm.

Método de Evaluación. Se miden los anchos de las grietas y además se registra el área rectangular que cubre la falla en bloque con respecto al área total evaluada.

Medida de Intervención Recomendada. Con el objetivo de reparar las condiciones presentadas por este tipo de daño se pueden tomar diversas medidas según el nivel de severidad. Para un nivel de severidad bajo no se requiere intervención. Para un nivel de severidad medio se realiza un sello de las Fisuras y grietas mediante la aplicación de un producto bituminoso sellante. En el caso de presentarse un nivel de severidad alto se recomienda realizar una renivelación de la superficie con una mezcla asfáltica en frío o en caliente, según pertinencia.

5.2.2.7. Piel De Cocodrilo

Este tipo de daño consiste en la degradación del pavimento a través de la aparición de grietas o Fisuras interconectadas que afectan la integridad de la capa de rodadura y que forman polígonos de tamaño variable, dando el aspecto de una malla o de la textura de la piel de un cocodrilo.

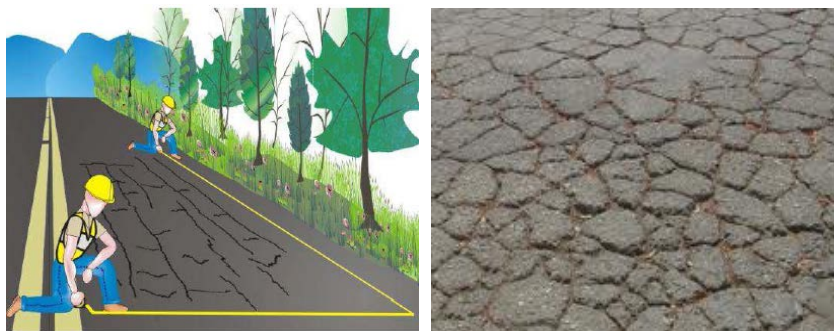


Figura 5.18: Apariencia de un pavimento afectado por Pérdida De Película De Ligante.

Causas. Entre las posibles causas de este tipo de deterioro se encuentran:

- Utilización de ligantes asfálticos demasiado duros.

- Reflejo de Fisuras en bases estabilizadas.
- Espesor insuficiente de la carpeta asfáltica por lo cual no soportó el nivel de tráfico al que fue expuesto.
- Utilización de bases granules de mala calidad.
- Daño por fatiga.

Nivel de Severidad. Para clasificar cualitativamente que tan grave es la magnitud de este tipo de daño se tiene que medir el área que abarca este tipo de deterioro y que tan grande son las aberturas de las grietas. Dependiendo de dicha medición, este tipo de daño se podrá clasificar en 3 niveles de severidad:

- Bajo: Fisuras finas que forman mallas superiores de 50 x 50 cm, sin pérdida de material.
- Medio: Enmallados con áreas entre los 20 x 20 cm y los 50 x 50 cm, con pérdida ocasional de materiales, Desprendimientos y ojos de pescado.
- Alto: Enmallados con áreas menores a 20 x 20 cm, con grietas muy abiertas y con perdida recurrente de materiales.

Método de Evaluación. Se miden los anchos de las grietas y además se registra el área rectangular que cubre este tipo de deterioro con respecto al área total evaluada.

Medida de Intervención Recomendada. Con el objetivo de reparar las condiciones presentadas por este tipo de daño se pueden tomar diversas medidas según el nivel de severidad. Para un nivel de severidad bajo se recomienda realizar un sello de las grietas y Fisuras mediante la aplicación de un producto bituminoso sellante. Para un nivel de severidad medio se recomienda realizar un tratamiento superficial simple. En caso de un nivel de severidad alto se recomienda adelantar medidas de parcheo.

6. DESARROLLO DE MATRICES DE TRANSICION DE PROBABILIDAD

6.1. GENERALIDADES

El programa de Administradores Viales fue creado para realizar el seguimiento y control al deterioro de los pavimentos en las vías no concesionadas del territorio nacional de Colombia, que permita la toma de decisiones respecto a la destinación de recursos para la intervención de la estructura de pavimento de forma racional y con un soporte técnico que respalde cualquier priorización de intervención entre las vías.

Este seguimiento consiste en la medición de diferentes tipos de deterioros que permiten caracterizar la condición funcional y estructural del estado del pavimento. La medición del estado del pavimento realizada por los Administradores Viales es consignada en un formato que contiene un grupo específico de daños que comúnmente se presentan en las vías.

Como se mencionó anteriormente, la fuente de los datos utilizados por este estudio proviene de la medición realizada a través del Criterio Técnico, la cual es implementada semestralmente para evaluar la evolución de los siguientes fenómenos de deterioro en el pavimento: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento y Otros.

6.2. MODELOS DE DETERIORO

Si se asume que en la construcción del pavimento se emplean materiales óptimos y que se toman las medidas de control adecuadas dentro del sistema constructivo, el deterioro de los pavimentos se presenta principalmente debido a la acción simultanea de las cargas de tránsito a las que se encuentra sometido y a los efectos medioambientales a los que está expuesto. Bajo estas condiciones y a medida que pasa el tiempo el desempeño del pavimento se ve afectado negativamente, es decir, la capacidad de satisfacer la demanda vehicular garantizando un nivel de serviciabilidad adecuado va disminuyendo.

Los modelos de deterioro del pavimento se pueden clasificar en 3 grupos **según el enfoque de la modelación** (Durango, 2002):

- **Modelos mecanicistas:** Son aquellos modelos que han sido utilizados para comprender el comportamiento del pavimento teniendo como base principios físicos y teorías aplicadas como la mecánica de sólidos, las propiedades mecánicas del pavimento bajo la acción de cargas y técnicas de análisis estructural multicapas. Este tipo de modelos presenta ciertas desventajas como la de solo poder representar el comportamiento del pavimento ante ciertas situaciones limitadas.
- **Modelos empíricos:** Es un tipo de modelo que se vale de técnicas o herramientas estadísticas para poder estimar cómo será el proceso de deterioro del pavimento a través de variables explicativas. Estos modelos corresponden a una evaluación indirecta y requieren registros históricos que contengan información acerca de la variación del estado del pavimento con el transcurrir del tiempo. Las capacidades predictivas de estos modelos dependen en gran medida de la calidad y cantidad de la información contenida en las bases de datos.
- **Modelos Empírico-Mecanicistas:** Es una combinación de los dos anteriores. El enfoque mecanicista ayuda a determinar las respuestas del pavimento, la estructuración de las variables explicativas y las formas funcionales de los modelos empíricos. La relación final entre la variable respuesta y las variables explicativas se desarrolla a través de técnicas estadísticas adoptadas en el enfoque empírico. Básicamente son modelos físicos cuyas variables son calibradas a través de métodos estadísticos para representar modelos reales. Su apropiada utilización saca ventajas de ambos enfoques y se espera que genere mejores modelos de rendimiento que con solo uno de los enfoques por separado (Zheng Li, 2005).

También se pueden clasificar **según el resultado de las predicciones** de los modelos en dos categorías principalmente (Durango, 2002):

- **Modelos determinísticos:** en estos modelos la condición futura de una sección de pavimento es predicha con el valor exacto de cualquier indicador

de desempeño o un índice de condición del pavimento con base en información histórica del pavimento.

- **Modelos probabilísticos:** estos modelos predicen el estado futuro del pavimento en términos de la probabilidad de desmejorar a un estado de servicio en particular, describiendo la posible condición del pavimento como un proceso aleatorio.

El tipo de modelos de predicción empleado en esta investigación para pronosticar los estados futuros del pavimento fueron los Modelos Probabilísticos, a través del desarrollo de Matrices de Transición de Probabilidad, con base a registros históricos de los estados de las vías del país. La principal razón de la selección de este tipo de modelo es el hecho de que es una metodología sencilla de aplicar y se ajusta la forma cualitativa como se califica el estado de los tramos de pavimentos por parte de los Administradores Viales. Es importante resaltar que, a pesar de ser una metodología sencilla, los resultados obtenidos con enfoques más complejos, que requieren mayor información, no arrojan mejores predicciones según los estudios comparativos realizados y documentados en la literatura (Jiang et al., 1987). Adicionalmente la escogencia de Modelos Probabilísticos se debe a que lo que se pretende es predecir un estado global del pavimento a nivel de red que ayude a los entes encargados a priorizar actividades de mantenimiento y rehabilitación, y no existe manera de modelar el comportamiento de este índice global a través de modelos mecanicistas. Por último, se optó por esta metodología de análisis ya que se consideró que es la que mejor captura la naturaleza estocástica del normal deterioro de los pavimentos, debido a que este fenómeno involucra una gran cantidad de variables, e intentar determinar la incidencia de cada una de ellas de manera independiente no resulta práctico (Prozzi and Madanat, 2000).

6.2.1. Teoría De Markov Aplicada Al Deterioro Del Pavimento

Se considera que un proceso cumple con la propiedad de Markov si su condición o estado futuro puede ser predicho teniendo como base su estado actual. En otras palabras, la probabilidad de alcanzar cierta condición futura depende de su condición existente. (R. Howard, 1971).

Una cadena de Markov es por ende un proceso estocástico discreto en el cual si se conoce el estado actual (x_n) y los estados anteriores (x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) entonces la probabilidad de alcanzar un estado futuro (S_{n+1}) no depende de los estados anteriores (x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) sino que depende únicamente del estado actual (x_n), para cualquier sucesión de estados futuros S_{n+1} . El cálculo anterior se puede expresar matemáticamente como se muestra en la Ecuación 6.1.

$$P(X_{n+1} = s_{n+1} | x_1 = s_1, x_2 = s_2, \dots, x_n = s_n) = P(X_{n+1} = s_{n+1} | X_n = s_n) \quad (6.1)$$

Los modelos de predicción Markov constituyen procesos estocásticos regidos por tres restricciones (Ortiz-García et al., 2006):

1. El proceso es discreto en el tiempo. Se definen periodos de análisis de meses o de años.
2. El proceso debe tener un espacio definido, contable y finito (conjunto de estados posibles definidos).
3. El proceso debe satisfacer la propiedad Markov (Isaacson and Madsen, 1976).

Según Golobali et al. (1983), en la teoría de Markov existen dos tipos de procesos y cada uno obedece a diferentes suposiciones. El primero corresponde a las cadenas de Markov homogéneas, este método asume que la condición presente o actual del estado del pavimento solo está relacionada con el estado previo, en otras palabras, asume que las variables de impacto sobre el pavimento son constantes durante el periodo de análisis.

Por otra parte, están los modelos de cadenas de Markov no homogéneos que se utilizan para caracterizar los cambios en la tasa de deterioro del pavimento con el paso del tiempo. Las cadenas de Markov no homogéneas se pueden desarrollar a partir de modelos basados en el estado del pavimento o modelos basados en el tiempo. Los modelos basados en el estado del pavimento cuantifican la probabilidad de transición de una condición del pavimento a otra durante un periodo de tiempo previamente determinado y los modelos basados en el tiempo estiman la distribución de probabilidad del tiempo que transcurrirá para que el pavimento pase de un estado o condición a otra (Mishalani et al., 2002). Es mucho más común que en la práctica

se desarrollen modelos basados en el estado del pavimento debido a que este tipo de modelo no requiere una frecuencia de recolección de datos tan elevada como en el caso de los modelos basados en el tiempo.

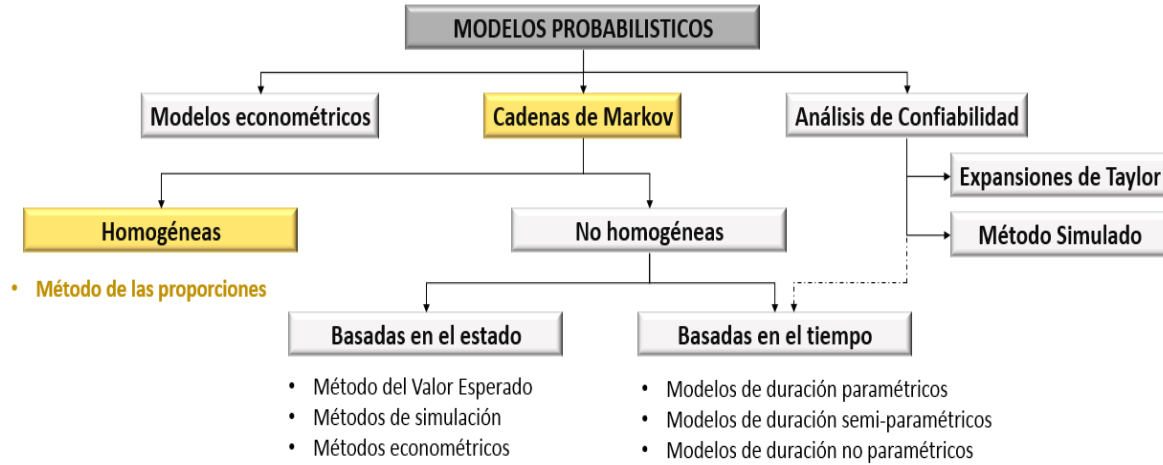


Figura 6.1: Tipología de modelos probabilísticos (Zheng Li, 2005).

La Figura 6.1 muestra un esquema donde se presentan los diferentes tipos de modelos probabilísticos convencionalmente usados para describir el proceso de deterioro de los pavimentos. Se resalta en amarillo la metodología que se adoptó para esta investigación, la cual facilita el desarrollo de modelos de cadenas de Markov homogéneas y se trata del método de las proporciones (Wang et al., 1994), dicho método calcula directamente las probabilidades de transición de una condición del estado del pavimento a otra.

El eje central de los modelos de cadena de Markov basados en el estado del pavimento es el desarrollo de Matrices de Transición de Probabilidad. Estas Matrices de Transición de Probabilidad (MTP), utilizadas para modelar el deterioro del pavimento, obedecen la forma general mostrada en la Ecuación 6.2:

$$M = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1j} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{i1} & P_{i2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

La probabilidad de transición, P_{ij} , representa la probabilidad de que aquellas áreas o zonas de la red vial que estén en una condición i pasen a presentar un estado o

condición j en una unidad del tiempo de análisis. Todas las Matrices de Transición de Probabilidad deben cumplir con las siguientes características:

- Son matrices cuadradas.
- Todos los elementos de la matriz deben ser no negativos y menores o iguales a 1.
- La sumatoria de todos los elementos de cada fila debe ser igual a 1.

Adicionalmente, cuando se trata de la modelación del deterioro del pavimento las matrices de transición de probabilidad presentan otras dos restricciones:

- $P_{ij} = 0$ si $i > j$, esto indica que el pavimento no puede mejorar su condición sin que este haya sido sometido a una actividad de mantenimiento o rehabilitación.
- $P_{nn} = 1$, indica que la zona del pavimento ha llegado a su peor condición y no puede seguir deteriorándose.

Según Yang et. al (2005), las proporciones de la red para cada una de las condiciones varían a lo largo del tiempo por lo cual es necesario que se realice un promedio para calcular cada uno de los P_{ij} , esto con el objetivo de aumentar la exactitud del modelo desarrollado.

Considerando estas restricciones, las Matrices de Transición de Probabilidad para modelar los procesos de deterioro del pavimento se expresan de manera general como se muestra en la Ecuación 6.3:

$$M = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \cdots & P_{1j} \\ 0 & P_{22} & P_{23} & \cdots & P_{2j} \\ 0 & 0 & P_{33} & \cdots & P_{3j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Adicionalmente, si se considera que el pavimento no puede deteriorarse más allá del nivel o estado inferior siguiente en una unidad de tiempo, la Matriz de Transición de Probabilidad para este caso presenta la forma que se muestra en la Ecuación 6.4:

$$M = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P_{22} & P_{23} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Para determinar los valores P_{ij} que componen la Matriz de Transición de Probabilidad es necesario observar el proceso de deterioro del pavimento y tener disponibilidad de datos históricos que registren el cambio de condición en el mismo. En caso de que no se cuenten con datos históricos acerca del cambio de condición del pavimento, se pueden desarrollar estos modelos con base en el criterio de expertos (Jiang, 1989; Chu, et al. 2005). La Ecuación 6.5 indica la forma de calcular los valores de P_{ij} :

$$P_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} \quad (6.5)$$

Dónde:

N_{ij} : Hace referencia a la cantidad de tramos del pavimento o de la red vial que pasaron de la condición i a la condición j dentro de un periodo comprendido entre t y $t+1$.

N_i : Es la cantidad de tramos del pavimento o de la red que comenzaron el periodo de tiempo comprendido entre t y $t+1$ en la condición i .

En esta investigación para poder clasificar la condición del pavimento en las categorías de Muy Bueno, Bueno, Regular, Malo y Muy Malo se utilizó el Índice Superficial de Estado (ISE), el cual, como se explicó anteriormente, se obtiene de la ponderación de diversas variables que caracterizan la condición del pavimento como la presencia de Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento y Otros. Además, este análisis se realizó considerando diferentes combinaciones de solicitaciones de tránsito (TPD Alto, Medio y Bajo) con tres posibles escenarios de temperatura ambiente (Alta, Media y Baja), bajo el supuesto de que cada uno de estos escenarios agrupa un conjunto de tramos de pavimentos que presentarían un tipo de daño similar en el tiempo.

El tamaño del Vector Inicial y de la Matriz de Transición de Probabilidad se presenta a continuación:

- La Ecuación 6.6 presenta el vector de condición inicial para el caso de estudio:

$$\begin{array}{c}
 \text{Muy Bueno; Bueno; Regular; Malo; Muy Malo} \\
 \mathbf{a_0} = [\mathbf{a_{01}} \quad \mathbf{a_{02}} \quad \mathbf{a_{03}} \quad \mathbf{a_{04}} \quad \mathbf{a_{05}}]
 \end{array} \quad (6.6)$$

Donde $a_{0i} = N_i/N$ y N_i es el número de sub-tramos del pavimento con una longitud de 1000 metros cuyo valor, según la variable que está siendo analizada, clasifica en la categoría i .

- La Ecuación 6.7 presenta como quedara definida la Matriz de Transición de Probabilidad para este caso de estudio:

$$\begin{array}{c}
 \text{Muy Bueno; Bueno; Regular; Malo; Muy Malo} \\
 \mathbf{M} = \begin{array}{l} \text{Muy Bueno} \\ \text{Bueno} \\ \text{Regular} \\ \text{Malo} \\ \text{Muy Malo} \end{array} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ 0 & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} & P_{35} \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & P_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{array} \quad (6.7)$$

Donde $P_{ij} = N_{ij}/N_i$ y N_{ij} es la cantidad de transiciones o cambios de una condición i a j , como puede ser el número de cambios presentados de una condición Buena a una condición Regular del pavimento. Mientras que N_i es la sumatoria de los elementos de la fila i en la matriz M .

6.3. CATEGORIZACIÓN DE DATOS

Para el desarrollo de la presente investigación fue necesario efectuar una depuración cuidadosa de los datos debido a la falta de continuidad y de organización encontrada en la información suministrada por el INVIAS.

Como consecuencia de la gran diversidad de condiciones climáticas y el amplio espectro de tránsito que afectan las vías del territorio nacional, se procedió a la separación de cada uno de estos dos componentes (Clima y TPD) en tres categorías

cada uno; Categoría Alta, Categoría Media y Categoría Baja. Lo anterior con el fin de representar las variaciones típicas de las condiciones de la red vial del país. Los criterios para establecer los umbrales que generan los nueve escenarios de estudio se explicaran con más detalle a continuación:

Para la categorización del tránsito se recurrió a los registros históricos de aforos realizados por el INVIAS¹ de las vías en estudio correspondiente a la ventana de tiempo de los informes de Administradores Viales utilizados en la presente investigación. En la Figura 6.2 se muestra el Tránsito Promedio Diario (TPD) para todos los tramos viales evaluados en el territorio nacional.

En la Figura 6.2 se presenta un Diagrama de Pareto de la distribución de los TPD para los casi 10000 tramos aforados por el INVIAS durante el año 2008, periodo de medición tomado para esta investigación.

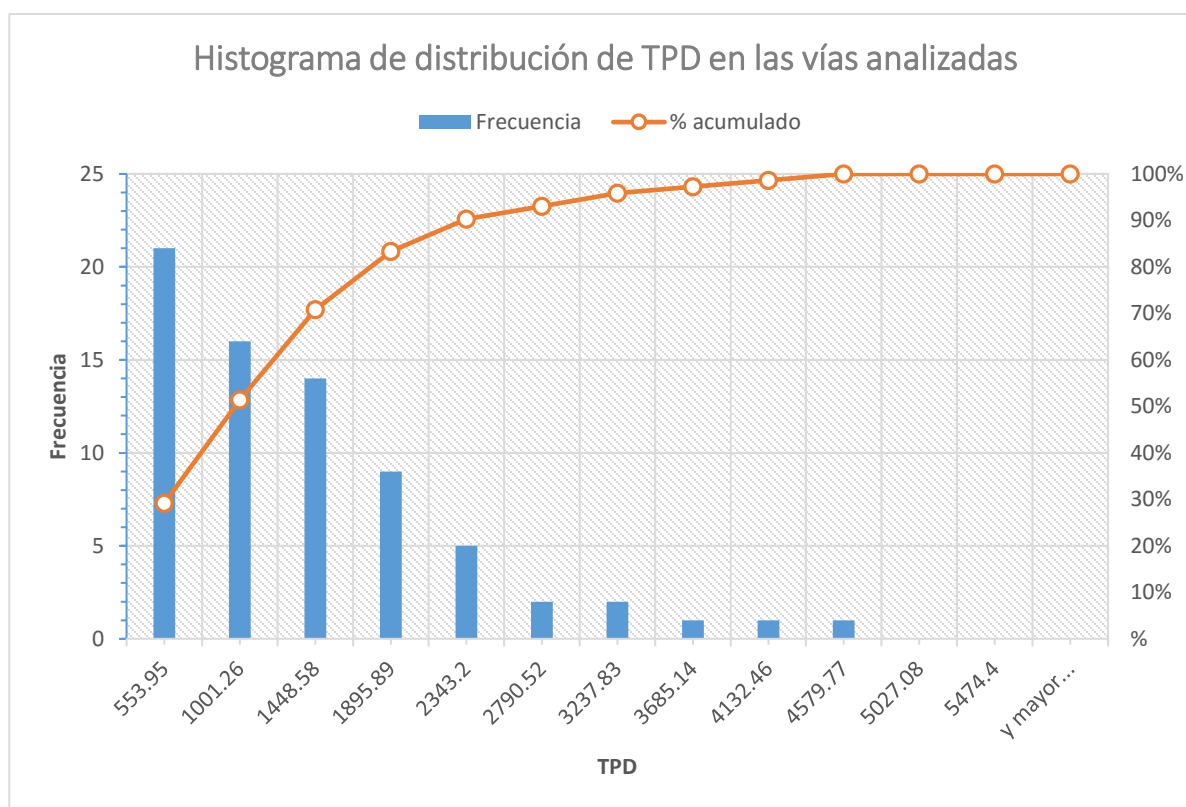


Figura 6.2: Medición de TPD para cada una de las vías de Colombia según Aforos realizados por el INVIAS.

¹ Informe INVIAS de Volúmenes de tránsito para la malla vial de Colombia 2008

En consecuencia, a lo explicado anteriormente, se definieron los siguientes umbrales de volumen de tránsito para cada una de las categorías establecidas:

- Categoría TPD “Bajo”: flujo vehicular vehículos pesados menores a 700.
- Categoría TPD “Medio”: flujo vehicular vehículos pesados de 700 a 2000.
- Categoría TPD “Alto”: flujo vehicular vehículos pesados de Mayores a 2000.

La Tabla 6.1 presenta los tramos que componen cada una de las tres categorías generadas según el TPD:

Tabla 6.1: Clasificación de tramos de vía en estudio según flujo vehicular.

INICIO TRAMO	FINAL TRAMO	TERRITORIAL	TPD	CATEGORIA
DUITAMA	LA PALMERA	BOYACA	5474	ALTO
HONDA	RIO ERMITAÑO	TOLIMA	4824	
BELÉN	SACAMÁ	BOYACA	4411	
SIBATE	FUSAGASUGA	CUNDINAMARCA	3229	
ANSERMANUEVO	CARTAGO	VALLE DEL CAUCA	3072	
TURBÓ	CHIGORODÓ	ANTIOQUIA	2878	
MONTERÍA	CERETÉ - LORICA	CORDOBA	2850	
ZIPAQUIRA	COGUA	CUNDINAMARCA	2816	
PUERTO LÓPEZ	PUERTO GAITAN	META	2752	
CERETÉ	LA YE	CORDOBA	2734	
EL VINO	EL ROSAL	CUNDINAMARCA	2662	
LORICA	CHINU	CORDOBA	2549	
EL VIAJANO	GUAYEPO	CORDOBA	2510	
PLANETA RICA	SECTOR EL KM 15	CORDOBA	2507	
CERETÉ	LORICA	CORDOBA	2507	
BARBOSA	TUNJA	BOYACA	2501	
BUCARAMANGA	SAN ALBERTO	SANTANDER	2500	
PUENTE NACIONAL	BARBOSA	SANTANDER	2485	
MEDIACANOA	LA VIRGINIA	VALLE DEL CAUCA	2400	
LA PINTADA	PEÑALISA	ANTIOQUIA	2388	
CALAMAR	BARRANQUILLA	ATLANTICO	2388	
SINCELEJO	CALAMAR	BOLIVAR	2388	
CHIQUEQUIRA	SABOYA	BOYACA	2332	
PLATO	PUEBLO NUEVO	MAGDALENA	2240	
ZIPAQUIRA	NEMOCON	CUNDINAMARCA	2239	
LERIDA	ANTIGUO ARMERO	TOLIMA	2183	
GUAMAL	EL BANCO	MAGDALENA	2120	

PUERTA DE HIERRO	MAGANGUE-YATI	BOLIVAR	2088	
ALVARADO	VENADILLO	TOLIMA	2084	
PLANETA RICA	MONTERIA	CORDOBA	2072	
BUCARAMANGA	BERLIN	SANTANDER	1897	MEDIO
TOCAIMA	GIRARDOT	CUNDINAMARCA	1875	
MIRANDA	MALAGA	SANTANDER	1581	
LAS JUNTAS	SANTA MARIA	BOYACA	1088	
CHIQUINQUIRA	TINJACA	BOYACA	1045	
PUERTO REY	MONTERIA	CORDOBA	868	
CHIQUINQUIRA	TUNJA	BOYACA	866	
SOGAMOSO	AGUAZUL (SOGAMOSO - EL CRUCERO)	BOYACA	860	
GUATAVITA	SESQUILE	CUNDINAMARCA	855	
LA CALERA	LA CABAÑA	CUNDINAMARCA	852	
CORNEJO	EL ZULIA	NORTE DE SANTANDER	848	
FRENZO	PETAQUEROS	CALDAS	805	
TORO	EL AMPARO	VALLE DEL CAUCA	781	
ORTEGA	GUAMO	TOLIMA	747	
CISNEROS	CRUCE	ANTIOQUIA	732	
CISNEROS	PUERTO BERRIO	ANTIOQUIA	728	
SARDINATA	EL ZULIA	NORTE DE SANTANDER	708	
NECOCLI	ARBOLETES(MULATOS-ARBOLETES)	ANTIOQUIA	702	
TULUA	RIO FRIO	VALLE DEL CAUCA	603	BAJO
T DE SANTA ROSA	VILLANUEVA	BOLIVAR	579	
BOGOTÁ	CHOACHI	CUNDINAMARCA	561	
CHIGORODÓ	DABEIBA	TOLIMA	451	
TRES PUERTAS	IRRA	CALDAS	444	
SAN CAYETANO	CORNEJO	NORTE DE SANTANDER	438	
SANTANA	LA GLORIA	MAGDALENA	404	
LA FRONTERA	LA UNION	ANTIOQUIA	397	
DABEIBA	SANTA FÉ DE ANTIOQUIA	ANTIOQUIA	392	
ALTO EL POZO	SARDINATA	NORTE DE SANTANDER	357	
TE ARGELIA	EL AMPARO	VALLE DEL CAUCA	339	
PACHO	LA PALMA	CUNDINAMARCA	326	
GARAGOA	CHINAVITA	BOYACA	293	

GUASCA	UBALA	CUNDINAMARCA	287
LA BODEGA	MOMPOX	BOLIVAR	282
OTANCHE	CHIQUEQUIRA	BOYACA	250
PORCECITO	CISNEROS	ANTIOQUIA	215
RAMIRIQUI	MIRAFLOREZ	BOYACA	202
TE DE VIANI	GUAYABAL	CUNDINAMARCA	195
BOLOMBOLO	SANTA FÉ DE ANTIOQUIA	TOLIMA	181
PUERTO REY	LORICA	CORDOBA	172
EL BANCO	SAN JOSÉ	MAGDALENA	160
CHAPARRAL	ORTEGA	TOLIMA	132
SANTA LUCIA	MOÑITOS	CORDOBA	106

Para la categorización del factor climático se utilizaron los registros históricos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) de los últimos diez años para asociarlo a cada uno de los tramos correspondientes. Se procedió a tomar la temperatura media anual ponderada del aire (wMMAT), esto, coherente con la metodología propuesta por la Shell para definir la temperatura de diseño de pavimentos, la cual se alimenta de las temperatura medias mensuales de cada año para calcular un factor de ponderación anual. En la Figura 6.3 se presenta la Carta W de diseño con la cual se obtienen los factores de ponderación antes mencionados. El ejercicio de cálculo del factor de ponderación de temperatura se llevó a cabo utilizando el software TMAP, el cual se detalla en el Anexo: Datos. En la Tabla 6.2 se aprecia la categorización generada según el clima y su respectiva territorial. Los umbrales que definen los tres niveles de temperatura usados en esta investigación fueron escogidos acorde a los límites establecidos por el INVIAS en su “Manual de Diseño De Pavimentos Asfálticos En Vías Con Medios y Altos Volúmenes De Tránsito”. Este manual establece los siguientes valores límites para las categorías: Categoría I, menor a 20°C; Categoría II, mayor de 20°C y menor que 27°C; Categoría III, mayor a 27°C.

En consecuencia, se definieron de la siguiente manera los umbrales para cada una de las categorías según la temperatura ambiente en la que se encuentra la vía:

- Categoría de temperatura Baja: temperaturas menores a 20°C.
- Categoría de temperatura Media: de 20°C a 27°C.
- Categoría de temperatura Alta: temperaturas mayores de 27°C.

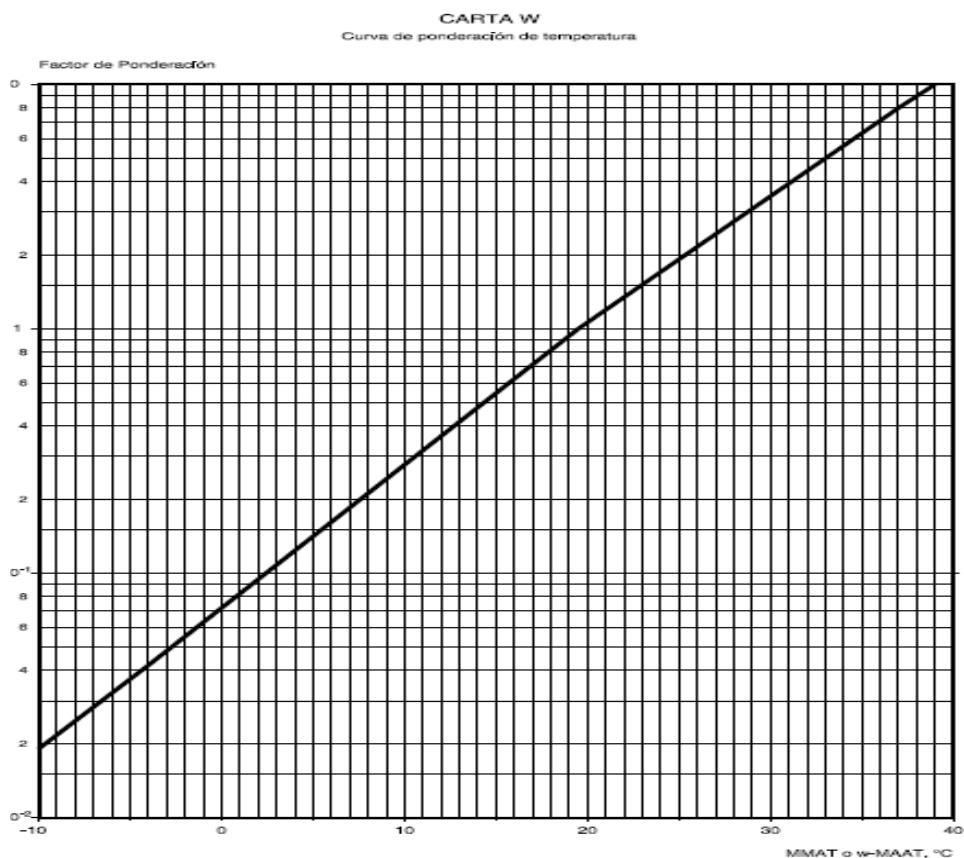


Figura 6.3: Curva de ponderación de temperaturas ambiente; Carta W.

Tabla 6.2: Categorización del clima según temperatura promedio de los últimos 10 años para cada territorial y Temperatura Media Anual Ponderada (TMAP).

<i>Temperatura Ambiente (Promedio últimos 10 años), °C</i>	<i>Temperatura Media Anual Ponderada (TMAP), °C</i>	<i>Ciudad</i>	<i>Territorial</i>	<i>Nivel de temperatura</i>
29.4	29.4	Santa Marta (Simón Bolívar)	Magdalena	Alta
28.8	28.8	Montería (Los Garzones)	Córdoba	
28.06	28.2	Cartagena (Rafael Núñez)	Bolívar	
27.84	27.8	Cúcuta (Camilo Daza)	Norte de Stder.	
27.82	27.5	Barranquilla (Ernesto Cortissoz)	Atlántico	
27.1	27.2	Villavicencio (Vanguardia)	Meta	
25.3	25.3	Ibagué(Perales)	Tolima	Media
23.57	23.5	Cali (Alfonso Bonillaragon)	Valle	
23.4	23.1	Medellín (Olaya Herrera)	Antioquia	
21.97	22.4	Bucaramanga(Palonegro)	Santander	
20.05	22.3	Pereira(Matecana)	Risaralda	
13.4	12.9	Bogotá (El dorado)	Boyacá	Baja
12.9	11.9	Tunja	Cundinamarca	

Se aprecia alguna desproporción en la cantidad de territoriales asociadas a cada una de las categorías generadas, sin embargo, hay que tener en cuenta que, en kilómetros efectivos, esto es, el número total de kilómetros que aporta cada territorial, las nueve categorías tienen prácticamente la misma cantidad de kilómetros.

De aquí en adelante y para mayor claridad para el lector se utilizarán las siguientes convenciones para identificar cada una de las nueve categorías establecidas. Se empleará el siguiente esquema: [Nivel de temperatura, Nivel de Tránsito Promedio Diario]. En la Tabla 6.3 se presentan todas las combinaciones posibles y su respectiva simbología:

Tabla 6.3: Convección utilizada para cada una de las Nueve categorías de Temperatura y TPD.

Categoría	Símbolo
Temperatura Alta y TPD Alto	[A,A]
Temperatura Media y TPD Alto	[M,A]
Temperatura Baja y TPD Alto	[B,A]
Temperatura Alta y TPD Medio	[A,M]
Temperatura Media y TPD Medio	[M,M]
Temperatura Baja y TPD Medio	[B,M]
Temperatura Alta y TPD Bajo	[A,B]
Temperatura Media y TPD Bajo	[M,B]
Temperatura Baja y TPD Bajo	[B,B]

Luego de esta primera clasificación, fue necesario identificar los tramos de vías cuyos informes de Criterio Técnico se encontraban completos para la ventana de tiempo de estudio, para tener la misma cantidad de mediciones para todas las vías que componen los diferentes escenarios y de esta forma poder mantener constante el intervalo de tiempo de medición (seis meses) para todos los tramos que se utilizarán en la determinación de las MTP.

Posteriormente se identificaron los tramos que no presentaron mejoría durante los periodos tenidos en cuenta en este estudio para excluirllos del análisis, ya que implicaban trabajos de mantenimiento y/o reparación. Esto con el fin de capturar la tendencia de deterioro natural de los pavimentos. Se conservaron tramos que presentaban disminuciones de calificación inclusive a niveles más inferiores al inmediatamente siguiente en la escala de calificación del estado del pavimento del

INVIAS, esto quiere decir, por ejemplo que un tramo que se encontrara en año cero con una calificación de Muy Bueno y que en el siguiente informe presentara una calificación de Regular, fue conservado y tenido en cuenta para la generación de matrices. Hay que recordar que el INVIAS califica cada tramo de vía en cinco categorías (Muy Bueno, Bueno, Regular, Malo y Muy Malo).

Acto seguido a la depuración de los datos bajo los criterios anteriormente descritos, se procedió a ubicar los datos restantes en cada una de las nueve categorías o escenarios generados al cruzar las tres categorías de Temperatura (Alto, Medio y Bajo) con las tres categorías de volumen de tránsito (Alto, Medio y Bajo) como se muestra a continuación en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4: Relación de tramos utilizados en esta investigación en cada uno de los escenarios generados según temperatura y volúmenes de tránsito.

			Temperatura (°C)		
			ALTO	MEDIO	BAJO
			Mayor a 27°C	27°C - 20°C	Menor a 20°C
TPD	ALTO	Mayor a 2000	Fundación-Aracataca (Magdalena)	Honda-río ermitaño (Tolima)	Barbosa-tunja (Boyacá)
			Puerta de hierro-yatí (Bolívar)	Dabeiba-santa fe de Antioquia (Antioquia)	Belen-sacama (Boyacá)
			El viajano-guayepo (Córdoba)	Turbo-chigorodo (Antioquia)	Duitama-la palmera (Boyacá)
			Lorica-chinú (Córdoba)	Bucaramanga-san alberto (Santander)	Chiquinquirá-saboya (Boyacá)
			Planeta rica-montería (Córdoba)	Puente nacional - barbosa (Santander)	Zipaquirá-nemocon (Cundinamarca)
			Montería-lorica (Córdoba)	Lerida-antiguo armero (Tolima)	Zipaquirá-cogua (Cundinamarca)
			Cerete-la ye (Córdoba)	Alvarado - venadillo (Tolima)	El vino - el rosal (Cundinamarca)
			Puerto López-puerto gaitán (Meta)	Casaverde-chigorodo (Antioquia)	Sibate - fusagasuga (Cundinamarca)
	MEDIO	700-2000	Puerto rey-montería (Córdoba)	Ortega-guamo (Tolima)	Chiquinquirá-tunja (Boyacá)
			Sardinata-el zulía (Norte de Santander)	Cisneros-puerto berrio (Antioquia)	Sogamoso-aguazul (Boyacá)
			Cornejo-el zulía (Norte de Santander)	Mediacanoa-la virginia (Valle del Cauca)	La calera-la cabaña (Cundinamarca)
			Plato-pueblo nuevo (Magdalena)	Ansermanuevo-cartago (Valle del Cauca)	Fresno-petaqueros (Caldas)
			Calamar-barranquilla (Atlántico)	Bucaramanga-berlin (Santander)	Guatavita-sesquile (Cundinamarca)
			Sincelejo-calamar (Bolívar)	Miranda - malaga (Santander)	Tocaima-girardot (Cundinamarca)
			Planeta rica-sector el km 15 (Córdoba)	Don diego - rionegro (Antioquia)	Chiquinquirá-tinjaca (Boyacá)
			Cerete-lorica (Córdoba)	Toro-el amparo (Valle del Cauca)	Las juntas-santa maria (Boyacá)
	BAJO	Menor a 700	Santana-la gloria (Magdalena)	Chaparral-ortega (Tolima)	Otanche-chiquinquirá (Boyacá)
			El banco-San José (Magdalena)	Necocli-arboletes (Antioquia)	Te de Viani-guayabal (Cundinamarca)
			Puerto rey-lorica (Córdoba)	Chigorodo-dabeiba (Tolima)	Bogotá-choachi (Cundinamarca)
			Santa lucía-moñitos (Córdoba)	Bolombolo-santa fe de Antioquia (Tolima)	Tres puertas-irra (Caldas)
			La bodega-mompox (Bolívar)	Porcecito-cisneros (Antioquia)	Pacho - la palma (Cundinamarca)
			San cayetano-cornejo (Norte de Santander)	Tulua - río frío (Valle del Cauca)	Guasca - ubala (Cundinamarca)
			Alto el pozo-sardinata (Norte de Santander)	La frontera-la union (Antioquia)	Garagoa - chinavita (Boyacá)
			T de santa rosa-villanueva (Bolívar)	Te argelia-el amparo (Valle del Cauca)	Ramiriquí - miraflores (Boyacá)

6.4. GENERACIÓN DE MATRICES DE TRANSICIÓN DE PROBABILIDAD

Para la generación de las Matrices de Transición de Probabilidad se elaboró una rutina programada en el software Matlab, que agilizo el procesamiento de los datos correspondiente a los cambios de estados de los tramos de vías consignados en la evaluación del Criterio Técnico. Esta rutina iniciaba asignando un valor numérico a cada estado cualitativo de los tramos de vía (Muy bueno=5, Bueno=4, Regular=3, Malo=2 y Muy Malo=1) y luego procedía a verificar dos condiciones, la primera que el tramo presentara mediciones en los nueve periodos de análisis, esto es, que no faltara ningún informe de los Administradores Viales para ese tramo en el periodo de análisis, y la segunda condición fue que en cada una de esas mediciones la calificación asignada se mantuviese igual o en su defecto, disminuyera. Los tramos que cumplieran estas dos condiciones eran seleccionados y se les asignaba un rotulo que identifica la categoría de temperatura y tránsito a la que pertenecía la vía. Finalmente se programaron contadores parciales que totalizaban cada una de las transiciones de calificación que se presentaban en cada categoría lo que determinaba cada uno de los coeficientes que componen la Matriz de Transición de Probabilidad. Como se mencionó anteriormente se tuvieron en cuenta disminuciones de la calidad del pavimento no solo a la categoría inferior inmediatamente siguiente, sino que también se tuvo en cuenta desmejoras a cualquiera categoría inferior que se presentara. Lo anterior da como resultado que las MTP generadas sean matrices triangulares superiores y no bandeadas en el centro como seria si se hubiese acotado los datos a solo un salto de categoría a la siguiente. A continuación, se presenta la Tabla 6.5 que condensa las nueve Matrices de Transición de Probabilidad generadas para las vías de Colombia clasificadas bajo los parámetros de flujo vehicular y temperatura ambiente media anual. Los umbrales de cada una de estas categorías se pueden apreciar en la parte superior y al margen izquierdo de la Tabla 6.5.

Tabla 6.5: Matrices de Transición de Probabilidad para cada uno de los escenarios de TPD y temperatura para las vías de Colombia.

			Temperatura														
			ALTO					MEDIO					BAJO				
			Mayor a 27°C					27°C - 20°C					Menor a 20°C				
TPD	ALTO	Mayor a 2000	0.2254	0.3662	0.2394	0.1332	0.0358	0.3949	0.1975	0.1720	0.1592	0.0764	0.2732	0.4208	0.1976	0.0195	0.0889
			0	0.4074	0.3700	0.1958	0.0268	0	0.6190	0.2608	0.1088	0.0114	0	0.5882	0.3352	0.0554	0.0212
			0	0	0.4015	0.5508	0.0477	0	0	0.7062	0.2748	0.0190	0	0	0.6953	0.2875	0.0172
			0	0	0	0.9807	0.0193	0	0	0	0.9850	0.0150	0	0	0	0.9892	0.0108
			0	0	0	0	1.0000	0	0	0	0	1.0000	0	0	0	0	1.0000
	MEDIO	700-2000	0.4068	0.2899	0.1439	0.1577	0.0017	0.4072	0.2905	0.1943	0.0904	0.0176	0.4848	0.3176	0.0771	0.1072	0.0133
			0	0.5773	0.2653	0.1525	0.0049	0	0.7188	0.1601	0.1076	0.0135	0	0.6974	0.2231	0.0701	0.0094
			0	0	0.6229	0.3689	0.0082	0	0	0.7263	0.2603	0.0134	0	0	0.7965	0.1941	0.0094
			0	0	0	0.9860	0.0140	0	0	0	0.9910	0.0090	0	0	0	0.9925	0.0075
			0	0	0	0	1.0000	0	0	0	0	1.0000	0	0	0	0	1.0000
	BAJO	Menor a 700	0.4167	0.3333	0.1667	0.0817	0.0016	0.4563	0.3437	0.1500	0.0482	0.0018	0.5626	0.3098	0.1044	0.0222	0.0010
			0	0.7181	0.2542	0.0098	0.0179	0	0.6608	0.2517	0.0841	0.0034	0	0.6106	0.2665	0.1162	0.0067
			0	0	0.8099	0.1863	0.0038	0	0	0.8895	0.1079	0.0026	0	0	0.9107	0.0879	0.0014
			0	0	0	0.9951	0.0049	0	0	0	0.9948	0.0052	0	0	0	0.9959	0.0041
			0	0	0	0	1.0000	0	0	0	0	1.0000	0	0	0	0	1.0000

Para fines de visualización se procedió a la construcción de la Figura 6.4, en la cual se muestra el comportamiento de la calificación estimada para una vía tipo, a través del tiempo, para cada una de las nueve categorías analizadas. Esta gráfica se construyó a partir de una vía con calificación “Muy Bueno” en perfecta condición, esto es, el Vector de Estado Inicial es [1,0,0,0,0]. Este vector se multiplica por cada una de las nueve MTP de la Tabla 6.5, elevadas a la potencia desde n igual a 1, hasta n igual a 40, siendo n el periodo de tiempo (semestres). Esta multiplicación genera un vector de estado para cada

instante de tiempo n , el cual se pondera con base a los pesos establecidos por el INVIAS para cada uno de las cinco categorías de vías (Muy Bueno, Bueno, Regular, Malo y Muy Malo) y de esta forma se obtiene un puntaje global de la calidad de la vía para cada instante. La ponderación usada por el INVIAS se presenta en la Tabla 6.6. Se consideró el valor de n hasta 40 (Semestres), ya que es un tiempo prudencial de estabilización del estado de la vía, teniendo en cuenta que los pavimentos flexibles se diseñan para una vida útil entre 15 a 20 años.

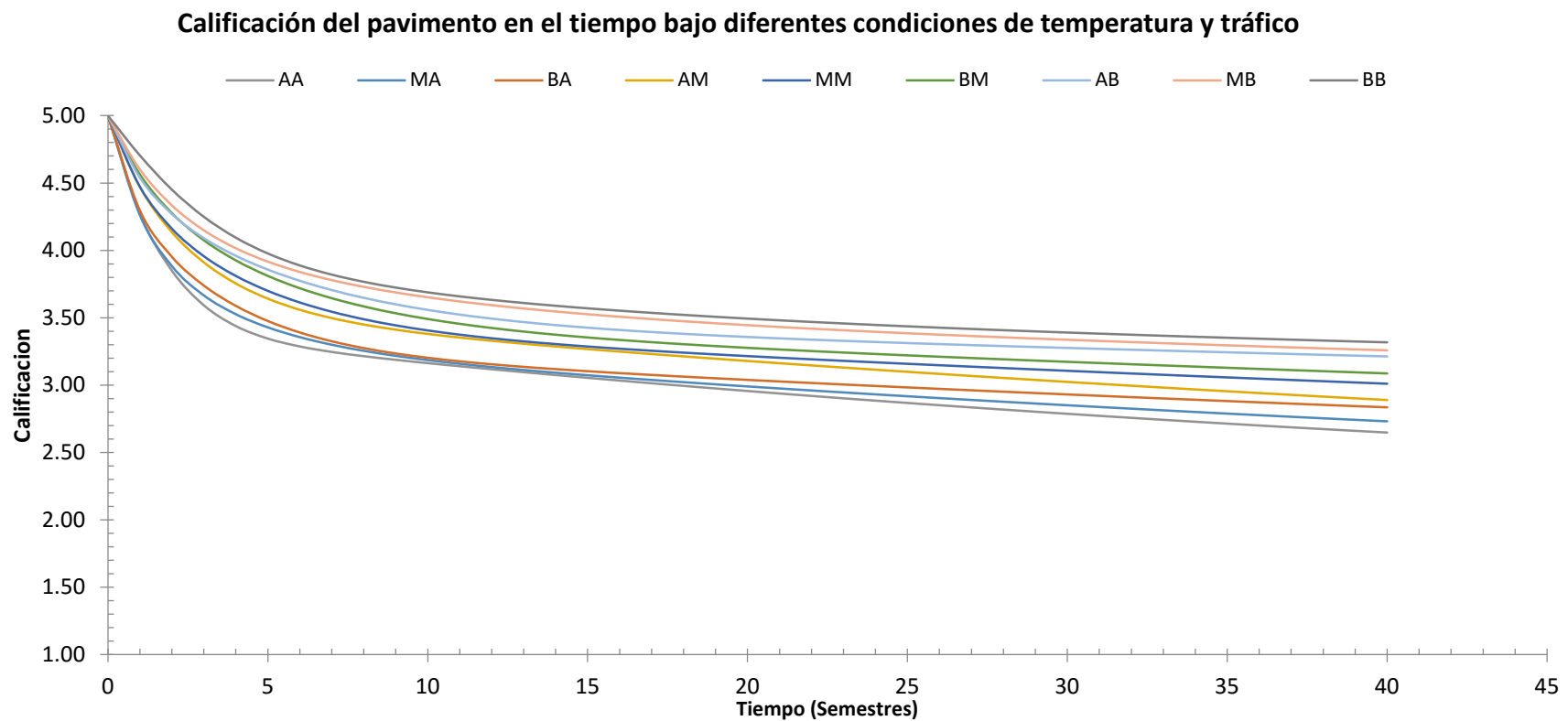


Figura 6.4: Simulación de estado ideal para cada una de las nueve matrices de transición de probabilidad para las vías de Colombia.

Tabla 6.6: Ponderación establecida por el INVIAS para cada uno de los posibles estados de red vial.

Estado	Ponderación INVIAS
Muy Bueno	5.0
Bueno	4.5
Regular	4.0
Malo	3.5
Muy Malo	2.0

Como se aprecia en la Figura 6.4, las curvas que presentan mayor velocidad de decaimiento son las que fueron generadas con las MTP de las condiciones de temperatura y tráfico más elevadas, lo cual era de esperar. Sin embargo, fue necesario recurrir a un método gráfico para poder determinar el grado de criticidad de cada matriz respecto a otras matrices. Si se observa con cuidado hay instantes de tiempo en que las gráficas se cruzan, lo cual convierte al método gráfico dependiente de la cantidad de periodos de tiempo que se seleccione para realizar el análisis. Esta limitación podría hacer que se incurran en errores al momento de generar ordenamientos y priorizaciones de intervención de las vías por parte de un ente gubernamental a cargo de la gestión de la red vial del país. Es por esto que surge la necesidad de desarrollar una metodología para definir de una manera más objetiva y analítica criticidad de una Matriz de Transición de Probabilidad. En esta investigación se pretende dar solución a esta limitación mediante el cálculo de un Índice de Criticidad (IC); la metodología para su cálculo, así como su sustento teórico, se describe en la sección que sigue a continuación.

6.5. ANÁLISIS DINÁMICO PARA LAS MATRICES DE TRANSICIÓN DE PROBABILIDAD

En la búsqueda de un índice que permita determinar de forma objetiva, la criticidad de una Matriz de Transición de Probabilidad para un pavimento, se introduce una metodología de análisis que es aplicable al caso de estudio en cuestión, como se explicará más adelante. Se entiende por “Criticidad” la rapidez con la que disminuye la puntuación de un tramo de vía generada por una MTP. El índice calculado a través de esta metodología se ha denominado Índice de Criticidad (IC), y se trata de un análisis a través de Sistemas Dinámicos de Tercer Orden, el cual se explica a un nivel de detalle pertinente en el marco de esta investigación.

Esta metodología es aplicable a fenómeno físico en estudio ya que cumple con las siguientes condiciones:

1. Las propiedades físicas del sistema son uniformes y homogéneas.
2. Los cambios de estados dentro del sistema se producen de manera gradual y continua.
3. Al llegar al estado final, el sistema se estabiliza y no varía más.

En la teoría de control de procesos es importante el monitoreo permanente de los sistemas y como las condiciones internas del mismo reaccionan a cambios en las condiciones de entrada. Para este monitoreo se recurre a herramientas matemáticas que permiten el modelamiento de la influencia que tiene el cambio de las variables de entrada sobre las variables de salida. Generalmente la formulación matemática de estos procesos no tiene una solución trivial al ser expresada en su forma diferencial, por lo que es de gran utilidad emplear la transformada de Laplace, que permite obtener la función de transferencia de dichos procesos, la cual es sencilla de resolver. Para los fines de esta investigación se hará mención únicamente a las funciones de transferencia de los procesos de control, ya que es la forma funcional que nos da información relevante respecto al comportamiento de éstos (C. Smith, A. Corripio, 2005). Los principales parámetros que caracterizan los procesos de cambio en sistemas dinámicos de primer orden o superior se pueden observar en las Figuras 6.5 y 6.6, que se muestran a continuación:

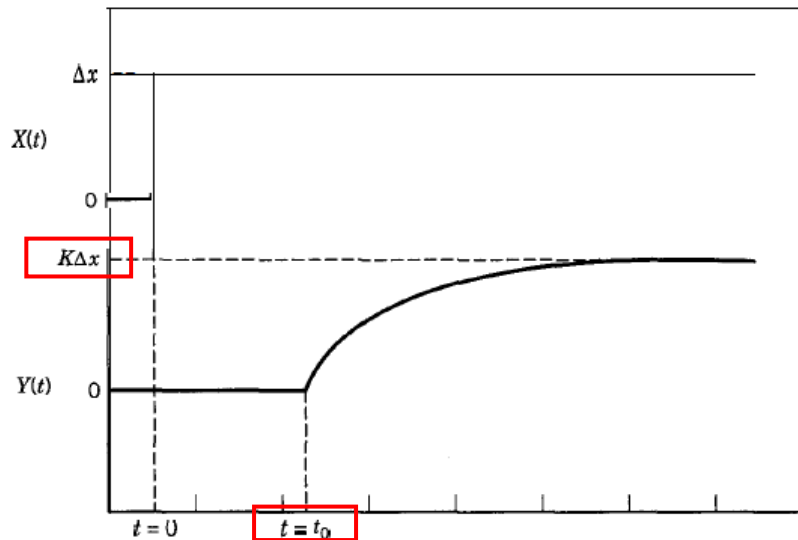


Figura 6.5: Respuesta típica de un proceso dinámico de primer orden con tiempo muerto.

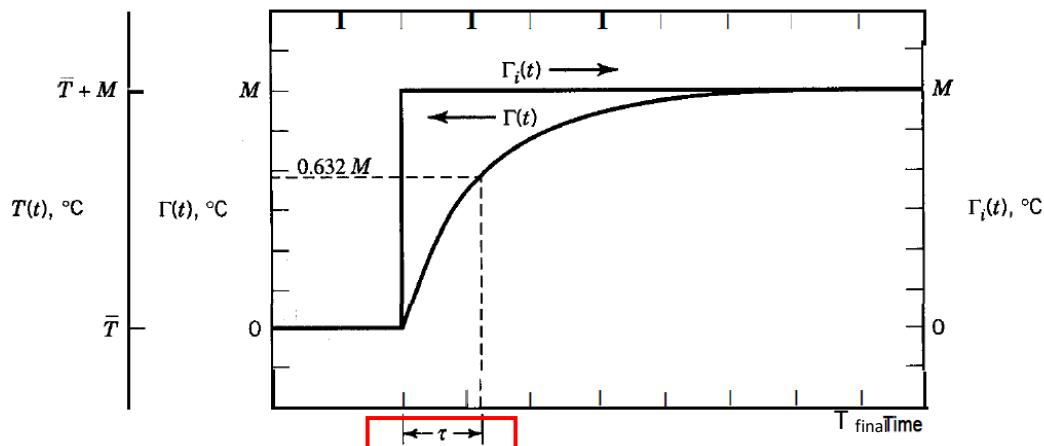


Figura 6.6: Respuesta típica de un proceso dinámico de primer orden donde se puede apreciar el parámetro “constante de tiempo”. En este ejemplo, la gráfica muestra la variación de la temperatura (°C) en función del tiempo.

Como se puede apreciar en las Figuras 6.5 y 6.6, existen tres conceptos principales en el estudio del control y la automatización de procesos dinámicos, los cuales son: la Ganancia (K), el Tiempo Muerto (t_0) y la Constante de Tiempo (τ). Su definición, su aplicación y su significado físico asociado al caso de estudio del deterioro de pavimentos se explican a continuación:

Ganancia (K):

Este parámetro depende de las propiedades físicas y características de funcionamiento del proceso. La ganancia indica la variación total del sistema, esto es, cuanto cambio presenta el proceso medido desde que el sistema comienza a variar ($t=0$), hasta que el sistema llega a su estado final o estable ($t=T_{\text{Final}}$). Para el

caso de estudio, hace referencia a la variación total de la calificación de la vía, desde que es puesta en servicio hasta que llega a un estado de inoperatividad, según los estándares de la metodología de calificación.

Tiempo muerto (t_0):

Es un parámetro que está enteramente relacionado con la inercia del fenómeno físico en estudio. Representa el tiempo que le toma al sistema comenzar a evidenciar cambios en la variable respuesta producto de modificaciones en alguna de las variables de entrada. Para el uso dado de esta metodología, en esta investigación el valor de t_0 se asume cero, ya que se considera que el deterioro de los tramos de vía inicia tan pronto ésta se habilita para su uso. Bajo esta hipótesis el significado que el tiempo muerto tendría en vías, estaría asociado con el tiempo que transcurre entre la terminación de las obras de construcción y la apertura definitiva de la vía, teniendo en cuenta que antes de que este evento ocurra, por la estructura de pavimento circula maquinaria y equipos de construcción que de alguna manera afecta la calidad de la estructura de pavimento. En otras investigaciones se podrían realizar mediciones que permitieran determinar valores de t_0 recomendables para minimizar la pérdida de calificación de la vía antes de su inauguración.

Constante de Tiempo (τ):

Este es el parámetro más importante para los fines de esta investigación, ya que da información acerca del tiempo que le toma a un proceso alcanzar determinado cambio respecto a su cambio total (K). Por lo tanto, la constante de tiempo está relacionado con la velocidad de respuesta del proceso. Cuanto más lenta sea la respuesta de un proceso a cambios en las variables de entrada, mayor será el valor de τ . Cuanto más rápido el proceso responda a cambios en una variable de entrada, menor será el valor de τ . Se debe mencionar que para el caso de sistemas dinámicos de primer orden τ indica el tiempo que le toma a la variable de salida llegar al 63.2% de su cambio total. En sistemas de orden superior, la constante de tiempo no tiene exactamente ese significado. En estos sistemas, se tendrán tantos valores de τ como sea el orden del sistema de modelación y no se puede decir que alguno de los valores de τ representa el tiempo para alcanzar el 63.2% del cambio total, sin

embargo, los valores de τ en la función de transferencia de estos sistemas son aún indicadores de la dinámica del sistema. Es por esta razón que se usa el término de Constante de Tiempo Efectiva (τ_{effect}), en lugar de solo parámetro como constante de tiempo (τ). En pocas palabras, se tiene que τ es un parámetro del sistema relacionado con su dinámica; que para sistemas de primer orden tiene una definición clara, y que para sistemas de orden superior es un indicador (Shinkey, 1988). Como constante de tiempo efectiva se debe tomar el mayor valor de las constantes de tiempo obtenidas, mientras esta sea de un orden de magnitud suficientemente grande respecto al valor de las otras constantes de tiempo (Shinkey, 1988).

A continuación, se presenta la forma general de las funciones de transferencia de los modelos dinámicos de primer orden (Ecuación 6.8), segundo orden (Ecuación 6.9) y tercer orden (Ecuación 6.10).

$$G(S) = \frac{K \cdot e^{-t_0 S}}{(1 + \tau S)} \quad (6.8)$$

$$G(S) = \frac{K \cdot e^{-t_0 S}}{(1 + \tau_1 S) \cdot (1 + \tau_2 S)} \quad (6.9)$$

$$G(S) = \frac{K \cdot e^{-t_0 S}}{(1 + \tau_1 S) \cdot (1 + \tau_2 S) \cdot (1 + \tau_3 S)} \quad (6.10)$$

En la búsqueda del enfoque más apropiado para caracterizar la Criticidad del fenómeno en estudio, se realizaron inicialmente intentos de ajustes a sistemas dinámicos de primer orden (Ver Figura 6.7) debido a su facilidad de cálculo, y adicionalmente porque su función de transferencia presenta de forma clara la constante de tiempo, τ . El inconveniente con este tipo de modelo es que no capturaba en su totalidad el comportamiento de los datos de los puntajes de los tramos generados a partir de las MTP. Posteriormente se probó con ajuste a sistemas dinámicos de segundo orden (Ver Figura 6.8), los cuales capturaban un poco mejor el comportamiento de los datos en los primeros años de deterioro, pero cuando el sistema empezaba a estabilizarse, el modelo se alejaba de los datos y el ajuste dejaba de ser adecuado. Estos modelos de segundo orden se caracterizan a través de dos parámetros, la constante de tiempo (τ), que brinda información acerca del tiempo que le toma al sistema alcanzar un estado estable (al igual que en los

modelos de sistemas dinámicos de primer orden) y una constante de amortiguamiento (ξ) que describe el comportamiento de los datos del sistema, en su proceso de estabilización través del tiempo. Ambos parámetros fueron calculados, pero no en todos los casos el valor de la constante de amortiguamiento del sistema era coherente con el comportamiento de los datos ajustados. Finalmente se probó con un ajuste a modelos dinámicos de tercer orden (Ver Figura 6.9) los cuales capturaban fielmente el comportamiento de los datos de puntajes de los tramos de vías a través del tiempo, y mostraba coherencia con el comportamiento de los valores de la constante de tiempo efectiva, esto es, que, en condiciones de tránsito alto y temperatura alta, la constante de tiempo presentaba menor valor que, en condiciones menos exigentes para las vías, como se parecía a continuación en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7: Valores de constantes de tiempo obtenidos para los modelos dinámicos de tercer orden generados para las puntuaciones de las vías en función del tiempo en cada escenario. Se resalta en gris la constante de tiempo efectiva (T_{effect}) o IC asociada a cada escenario.

	AA	MA	BA	AM	MM	BM	AB	MB	BB
τ_1	134.33	170.02	1.02	209.60	274.21	276.23	1.16	4.09	5.32
τ_2	1.19	0.00	3.32	0.80	5.42	0.72	317.08	1.05	1.09
τ_3	2.11	2.48	189.08	3.14	1.83	3.16	4.40	345.96	633.52

Como se mencionó anteriormente en los sistemas dinámicos de orden superior se toma como constante de tiempo efectiva (T_{effect}) el mayor valor de todas las constantes de tiempo calculadas. Se observa que cada ajuste calibra tres valores de τ (debido a que el sistema es de tercer orden), y que en cada caso hay uno que es mucho más grande que los otros dos valores.

De esta manera y como se aprecia en la Tabla 6.8 se define el indicador buscado de la siguiente manera: el Índice de Criticidad (IC) para Matrices de Transición de Probabilidad es el valor de la constante de tiempo efectiva (T_{effect}) calculada mediante la función de transferencia para sistemas dinámicos de tercer orden. Este índice permite determinar qué tan crítica es una MTP, respecto a otra, lo que quiere decir que entre más pequeño sea el IC de un matriz más rápido será el deterioro de las vías asociadas a esa MTP, y en entre más grande sea el IC más lento será el deterioro asociado a esa MTP comparativamente hablando.

Tabla 6.8: Índice de criticidad (IC) asociado a cada escenario generado para los factores de temperatura y TPD. La escala de colores indica la variación de los valores del IC, siendo rojo el valor más pequeño y verde el valor más grande.

IC		Temperatura		
		ALTO	MEDIO	BAJO
TPD	ALTO	IC [A,A]	IC [M,A]	IC [B,A]
		134.33	170.0200	189.0800
	MEDIO	IC [A,M]	IC [M,M]	IC [B,M]
		209.6000	274.2100	276.2300
	BAJO	IC [A,B]	IC [M,B]	IC [B,B]
		317.0800	345.9600	633.5200

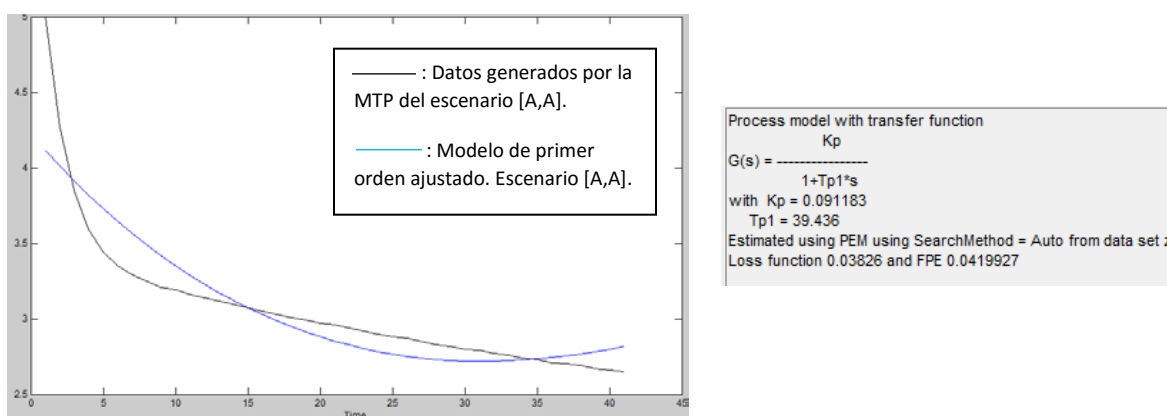


Figura 6.7: Ajuste de primer orden para el escenario [A,A]. En negro calificación predicha por la MTP [A,A], en azul el modelo ajustado. A la derecha se presenta la forma funcional del modelo ajustado. Software Matlab®.

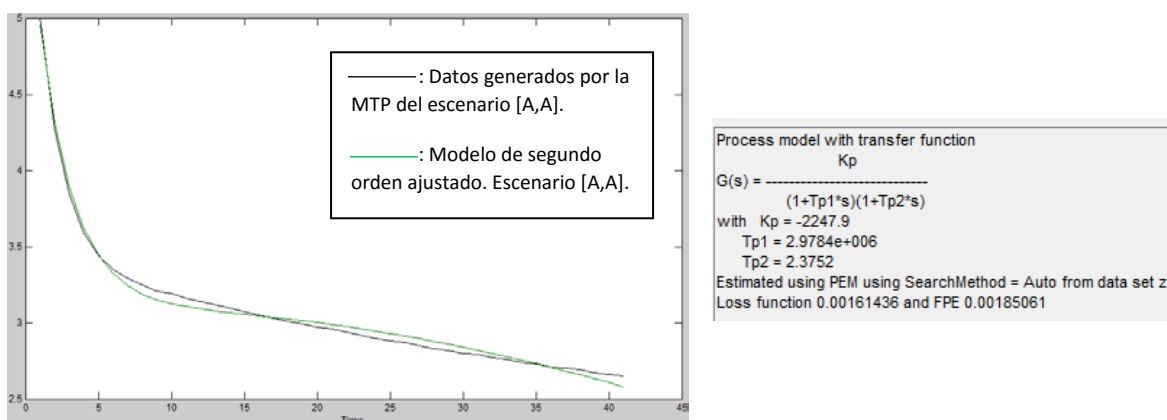


Figura 6.8: Ajuste de segundo orden para el escenario [A,A]. En negro calificación predicha por la MTP [A,A], en verde el modelo ajustado. A la derecha se presenta la forma funcional del modelo ajustado. Software Matlab®.

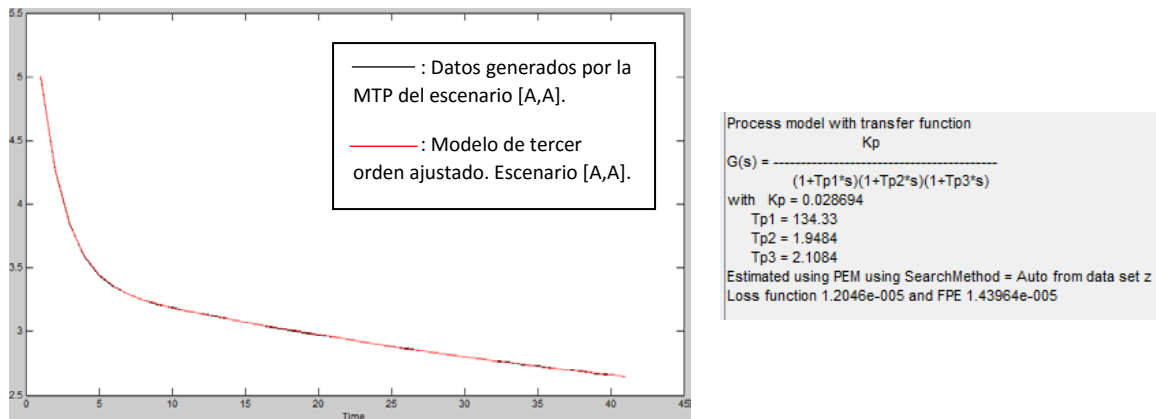


Figura 6.9: Ajuste de tercer orden para el escenario [A,A]. En negro calificación predicha por la MTP [A,A], en rojo el modelo ajustado. A la derecha se presenta la forma funcional del modelo ajustado. Software Matlab®.

Si bien se obtuvo un indicador satisfactorio, el IC, con el análisis de criticidad que cumple con las necesidades planteadas en el marco de esta investigación, se observó que el parámetro de ganancia (K) no era consistente con el tipo de proceso descrito, además que el valor mismo de las constantes de tiempo carecía de significado físico, a pesar de funcionar muy bien para la jerarquización de matrices. Por lo anterior se procedió a complementar el análisis dinámico de matrices con otro enfoque metodológico, aun encuadrado en la teoría de control y automatización de procesos.

Esta metodología complementaria es a través de una Función de Transferencia de Pulso, la cual trabaja con datos discretos a través de una transformación, denominada “Transformación Z”, cuya expresión general es la que se presenta en la Ecuación 6.11:

$$C(Z) = G(Z) \cdot M(Z) \quad (6.11)$$

Donde,

$G(Z) = \sum_{j=0}^{\infty} G(jT)Z^{-j}$ se conoce como la Función de Transferencia de Pulso del sistema.

$C(z)$ = Transformada Z de la señal de salida.

$M(z)$ = Transformada Z de la señal de entrada.

A continuación se presenta la Tabla 6.9, donde se muestran los resultados calibrados para Ganancia, Tiempo muerto y Tiempo Efectivo para los datos generados a partir de cada una de las nueve matrices generadas para cada uno de los nueve escenarios de las combinaciones Temperatura – TPD.

Tabla 6.9: Parámetros calibrados para la función de transferencia de pulso para cada escenario de análisis.

			Temperatura								
			ALTO			MEDIO			BAJO		
			Mayor a 27°			27°- 20°			Menor a 12°		
TPD	ALTO	Mayor a 2000	Gain	τ	t0	Gain	τ	t0	Gain	τ	t0
			-2.1409	1.5874	0.5000	-2.0838	1.5679	0.5000	-2.0171	1.5536	0.5000
	MEDIO	2000-700	Gain	τ	t0	Gain	τ	t0	Gain	τ	t0
			-1.8582	1.9521	0.5000	-1.9361	2.0523	0.5000	-1.6948	2.0712	0.5000
	BAJO	Menor a 700	Gain	τ	t0	Gain	τ	t0	Gain	τ	t0
			-1.8050	2.2659	0.5000	-1.6359	2.2750	0.5000	-1.6019	2.5920	0.5000

Como se aprecia en la Tabla 6.9, las ganancias (k) obtenidas son negativas, consistente con el comportamiento de la calificación del estado del pavimento, ya que esta va disminuyendo; recordemos que el valor de este parámetro se obtiene de la resta del valor inicial de calificación (“5” en este caso) menos la calificación del pavimento en su estado final de estabilización. El valor de tiempo muerto (t₀) se introduce como un parámetro de entrada en la estimación de la función de transferencia de pulso, debido a que es el paso o la frecuencia de medición de calificación del estado del pavimento. Finalmente, los valores obtenidos para la constante de tiempo (τ) en cada escenario, bajo este enfoque complementario, cobran significado físico al estar en un orden de magnitud (semestres) coherente con la vida útil esperada para un pavimento. Es importante resaltar que la función de transferencia de pulso es una función de transferencia de primer orden y por lo tanto el valor de τ vuelve a indicar el tiempo que le toma a la variable de salida llegar al 63.2% de su cambio total, lo cual aporta un significado aún más completo al fenómeno en estudio.

El único inconveniente hallado con esta metodología es que en los tres escenarios para el TPD alto, los valores de la constante de tiempo no presentan el orden esperado. Es decir que el escenario [B,A] tiene el valor de constante de tiempo más pequeño que el valor del escenario [A,A] y que el escenario [A,M]. Podría interpretarse que las condiciones de modelación no permitieron que la calibración de esto parámetros pudieran diferenciar claramente las condiciones de cada escenario, ya que los valores de τ para alto TPD son muy parecidos. También podría inferirse que, bajo una metodología de análisis discreta y no continua, la condición de TPD alto en las vías, es indiferente de la temperatura ambiente promedio donde estas se encuentren.

En la Tabla 6.10 que se presenta a continuación se muestra el ranking de las categorías de estudio, según su valor de constante de tiempo τ obtenido según la función de transferencia de pulso asociada.

Tabla 6.10: Ranking de criticidad para todos los escenarios de Temperatura-TPD, ordenados según el valor de la constante de tiempo asociada a cada uno para una función de transferencia de pulso.

Categoría	Índice de Criticidad (IC)
[B,A]	1.5536
[M,A]	1.5679
[A,A]	1.5874
[A,M]	1.9521
[M,M]	2.0523
[B,M]	2.0712
[A,B]	2.2659
[M,B]	2.2750
[B,B]	2.5920

6.6. VALIDACIÓN DE MODELOS

Una vez generadas las matrices de transición de probabilidad características para cada uno de los nueve escenarios estipulados para los niveles de temperatura y flujo vehicular, se procedió a verificar estos modelos con tramos de red que en el intervalo de tiempo de estudio nunca presentaron mejoría, y que no se incluyeron en los tramos empleados para la generación de las matrices. Es importante resaltar que

este análisis se realiza a nivel de red y que el objetivo de las MTP no es predecir el comportamiento del deterioro de una vía en particular, sino que busca predecir la distribución porcentual de estados de la red de manera global. Tal y como se puede apreciar en las gráficas comparativas que se muestran a continuación, los modelos presentan buena capacidad predictiva al capturar la tendencia de la distribución porcentual de estados del pavimento para cada instante de tiempo.

Para la comparativa se determinó el Vector de Estado Inicial (VEI) de la vía y se identificó la variación de la distribución porcentual durante los nueve semestres siguientes según las mediciones realizadas en las vías. Se ubicó dentro de la categoría adecuada para asociarle la matriz característica correspondiente y se aplicó la matriz a este VEI nueve veces que corresponden a los nueve meses de medición para la vía de análisis. A continuación se presentan, en las Figuras 6.10 a 6.17, los resultados de la validación de los modelos obtenidos, comparado la distribución porcentual de estados medidos por el INVIAS, con la predicha.

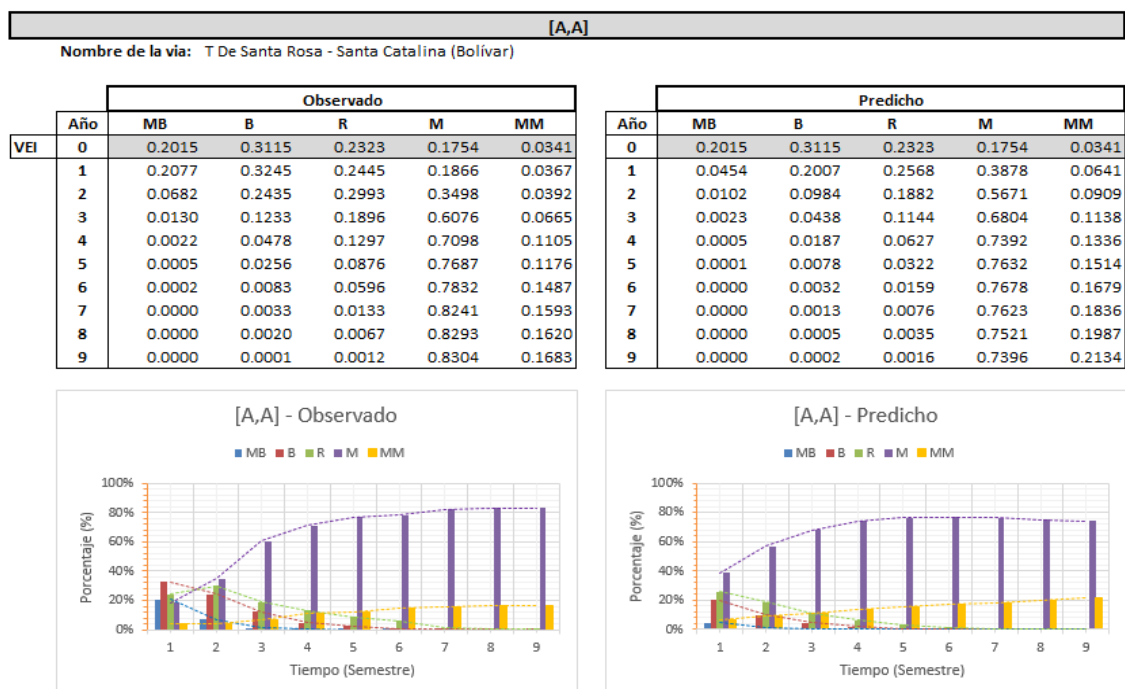


Figura 6.10: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [A,A], correspondiente a la vía **T De Santa Rosa - Santa Catalina (Bolívar)**.

[M,A]

Nombre de la vía: Socorro - Berlín (Santander)

		Observado							Predicho				
	Año	MB	B	R	M	MM		Año	MB	B	R	M	MM
VEI	0	0.3663	0.179	0.1711	0.1314	0.1079		0	0.3663	0.179	0.1711	0.1314	0.1079
	1	0.3776	0.1865	0.1801	0.1398	0.1160		1	0.1447	0.1831	0.2305	0.2542	0.1431
	2	0.1665	0.2187	0.2446	0.2665	0.1037		2	0.0571	0.1419	0.2354	0.3567	0.1645
	3	0.0781	0.1754	0.2609	0.3756	0.1100		3	0.0226	0.0991	0.2131	0.4406	0.1803
	4	0.0276	0.1044	0.2331	0.5098	0.1251		4	0.0089	0.0658	0.1802	0.5069	0.1938
	5	0.0102	0.0667	0.2104	0.5677	0.1450		5	0.0035	0.0425	0.1460	0.5574	0.2063
	6	0.0050	0.0538	0.1685	0.6297	0.1430		6	0.0014	0.0270	0.1148	0.5944	0.2181
	7	0.0012	0.0361	0.1306	0.6655	0.1666		7	0.0005	0.0170	0.0883	0.6202	0.2297
	8	0.0007	0.0107	0.1007	0.6888	0.1991		8	0.0002	0.0106	0.0669	0.6371	0.2409
	9	0.0000	0.0082	0.0598	0.7003	0.2317		9	0.0001	0.0066	0.0501	0.6471	0.2518

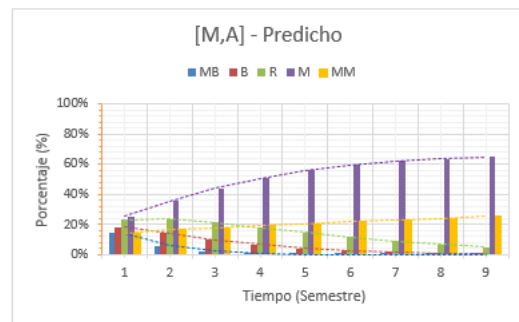
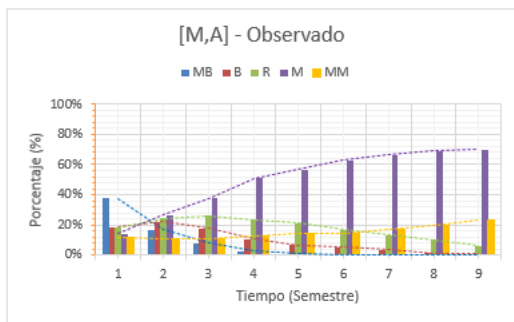


Figura 6.11: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [M,A], correspondiente a la vía **Socorro - Berlín (Santander)**.

[B,A]

Nombre de la vía: Puente Blanco-Sogamoso (Boyacá)

		Observado							Predicho				
	Año	MB	B	R	M	MM		Año	MB	B	R	M	MM
VEI	0	0.2779	0.3933	0.2048	0.0194	0.0629		0	0.2779	0.3933	0.2048	0.0194	0.0629
	1	0.2865	0.4097	0.2156	0.0206	0.0676		1	0.0759	0.3483	0.3291	0.1053	0.0997
	2	0.0876	0.3554	0.3352	0.0993	0.1225		2	0.0207	0.2368	0.3606	0.2195	0.1206
	3	0.0213	0.2187	0.3479	0.2496	0.1625		3	0.0057	0.1480	0.3342	0.3344	0.1360
	4	0.0045	0.1466	0.3368	0.3197	0.1924		4	0.0015	0.0894	0.2831	0.4352	0.1490
	5	0.0013	0.1008	0.2932	0.4018	0.2029		5	0.0004	0.0533	0.2271	0.5168	0.1606
	6	0.0004	0.0654	0.2199	0.5017	0.2126		6	0.0001	0.0315	0.1759	0.5795	0.1713
	7	0.0002	0.0221	0.1786	0.5342	0.2649		7	0.0000	0.0186	0.1329	0.6256	0.1813
	8	0.0000	0.0113	0.1328	0.5901	0.2658		8	0.0000	0.0109	0.0986	0.6580	0.1907
	9	0.0000	0.0095	0.1109	0.6052	0.2744		9	0.0000	0.0064	0.0722	0.6799	0.1997

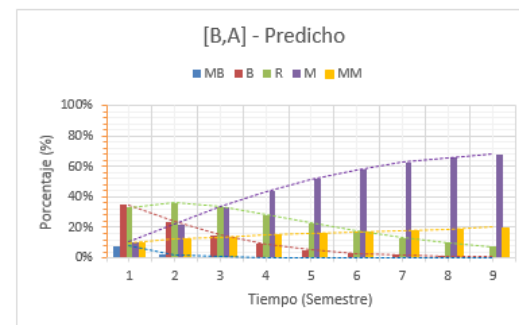
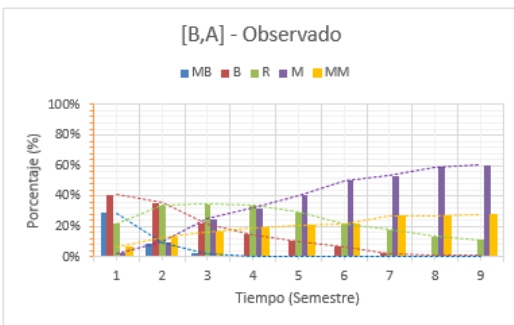


Figura 6.12: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [B,A], correspondiente a la vía **Puente Blanco-Sogamoso (Boyacá)**.

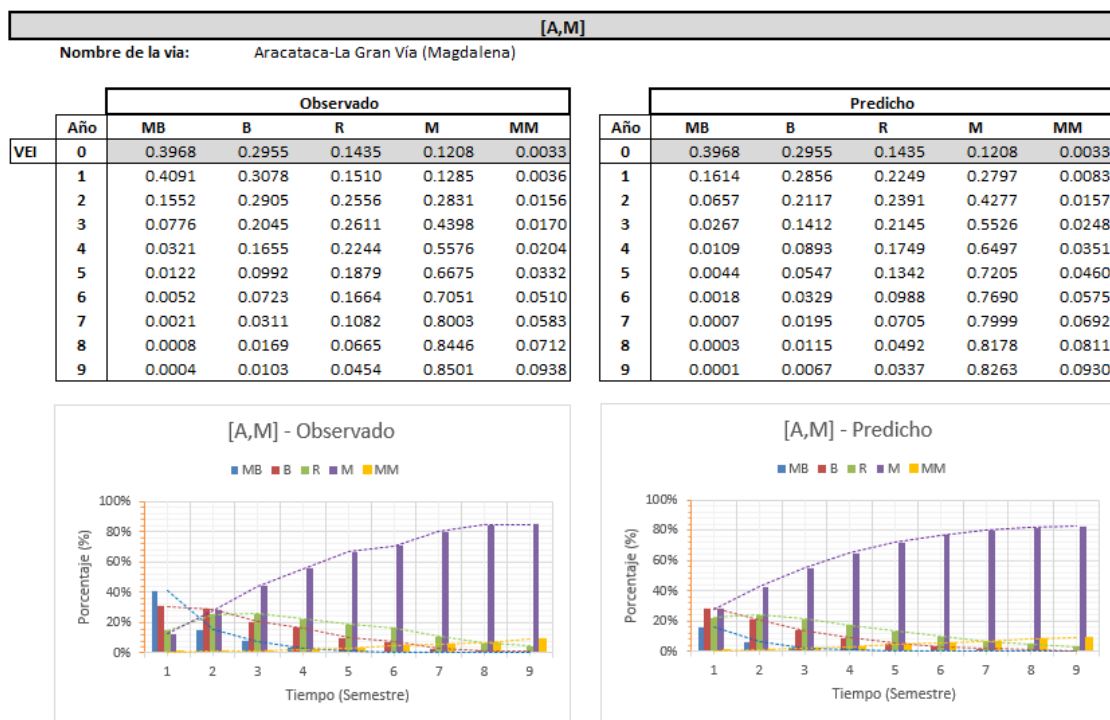


Figura 6.13: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [A,M], correspondiente a la vía **Aracataca-La Gran Vía (Magdalena)**.

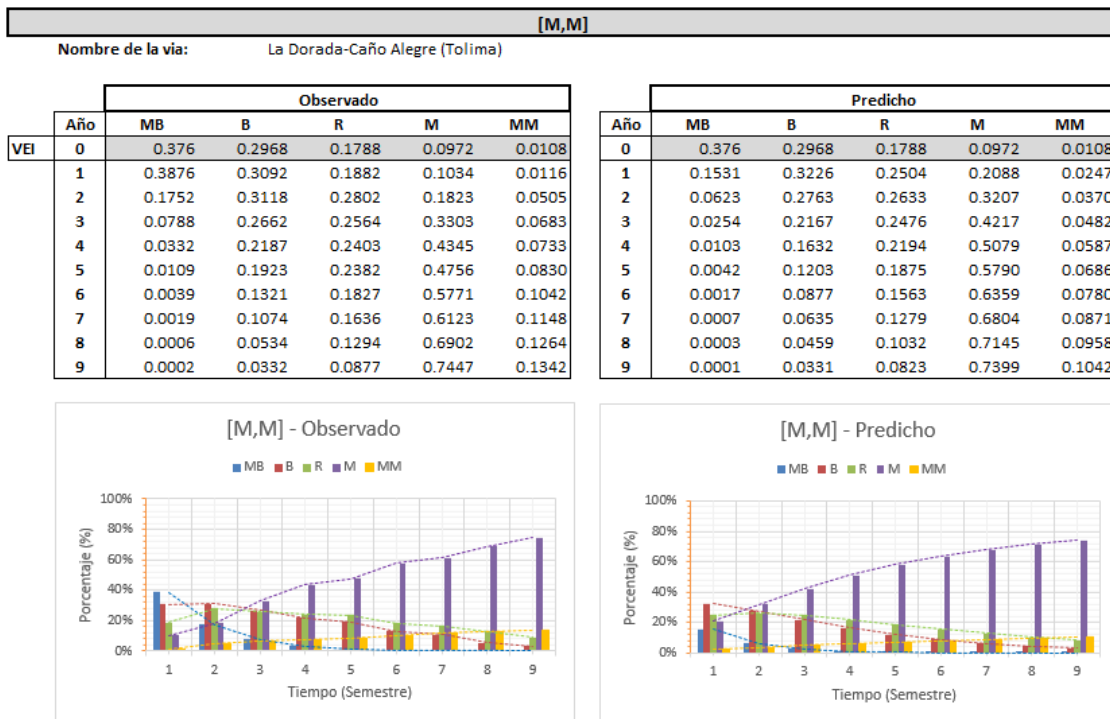


Tabla 6.11: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [M,M], correspondiente a la vía **La Dorada-Caño Alegre (Tolima)**.

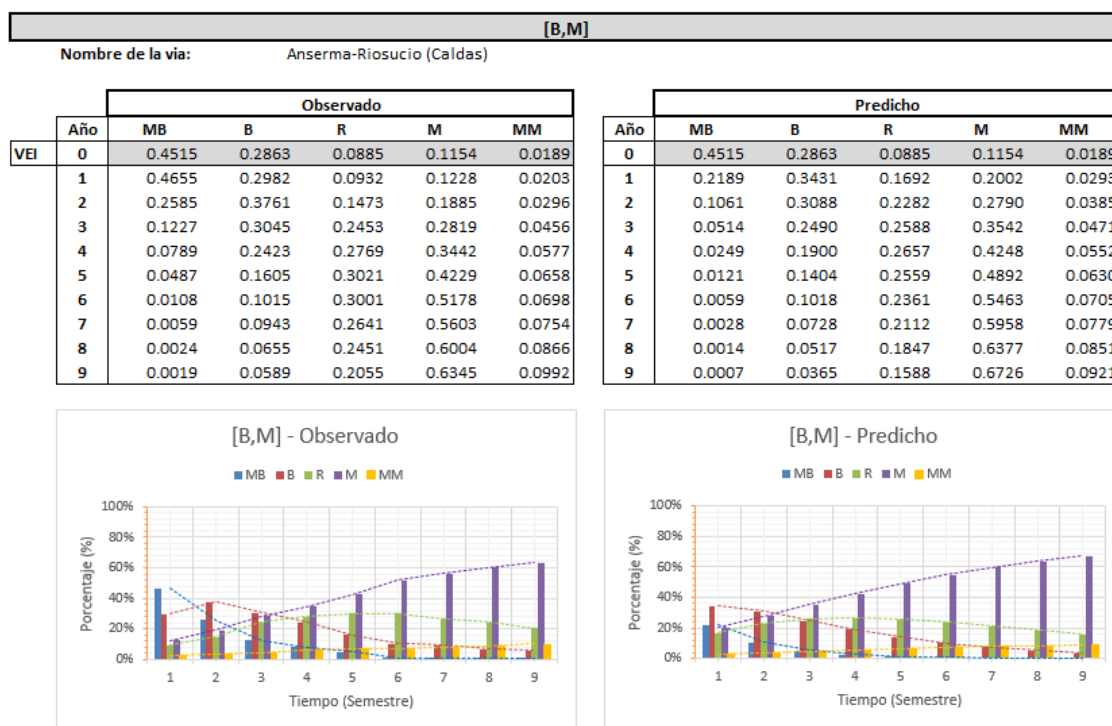


Figura 6.14: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [B,M], correspondiente a la vía **Anserma-Riosucio (Caldas)**.

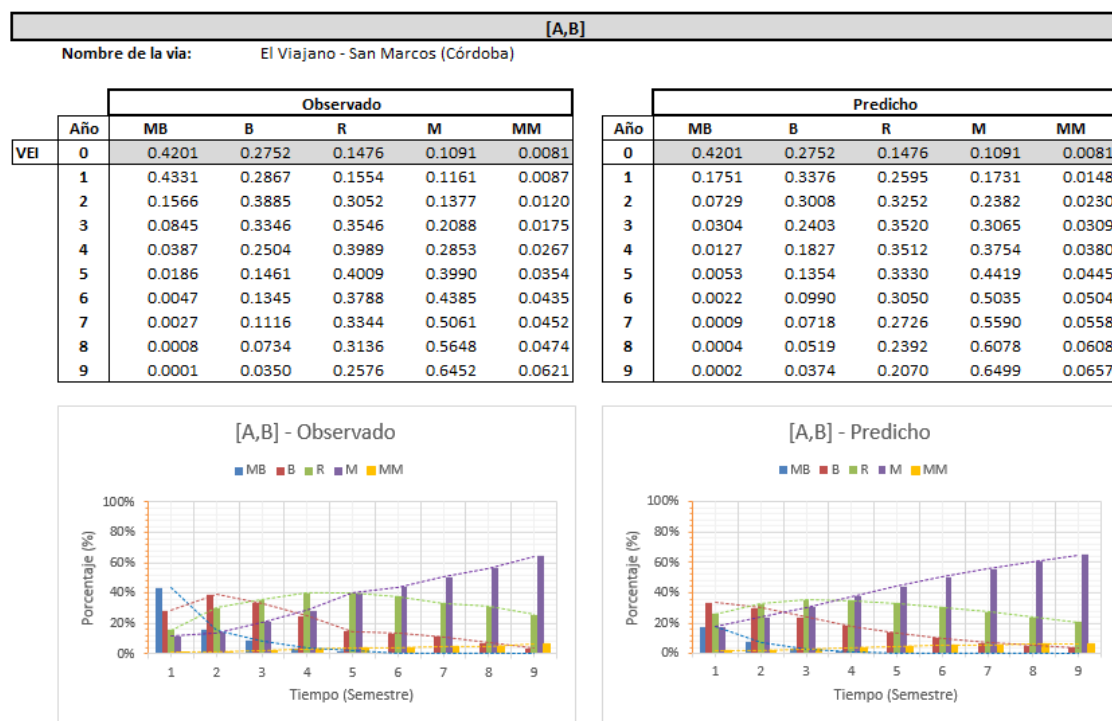


Figura 6.15: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [A,B], correspondiente a la vía **El Viajano - San Marcos (Córdoba)**.

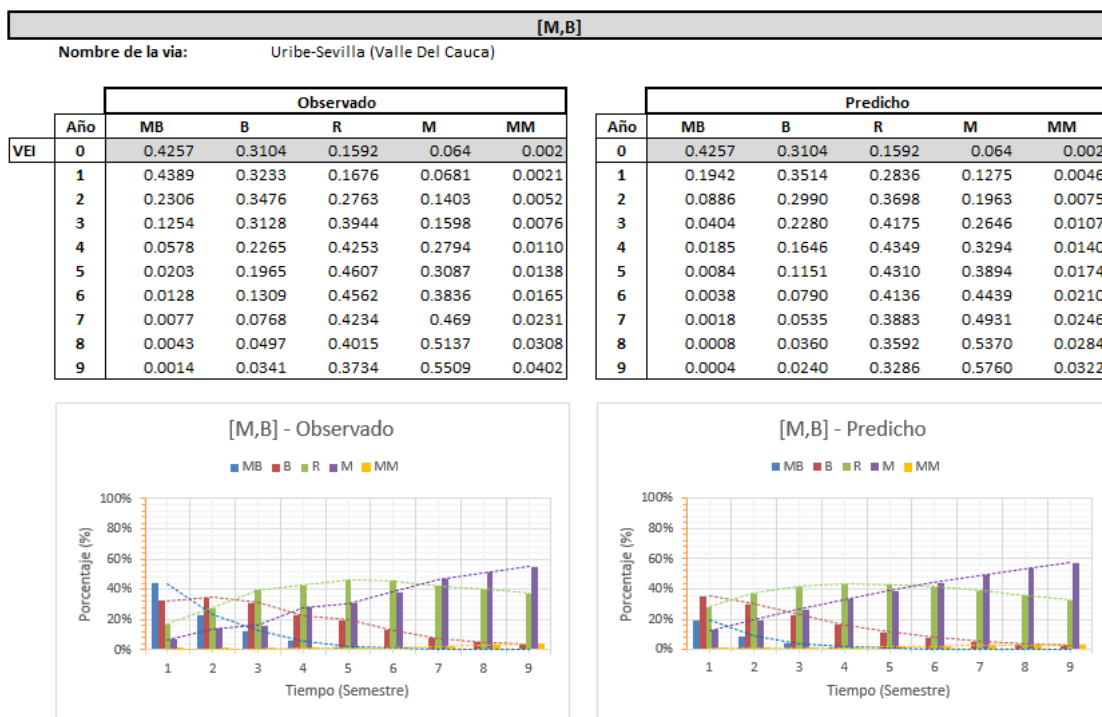


Figura 6.16: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [M,B], correspondiente a la vía **Uribe-Sevilla (Valle Del Cauca)**.

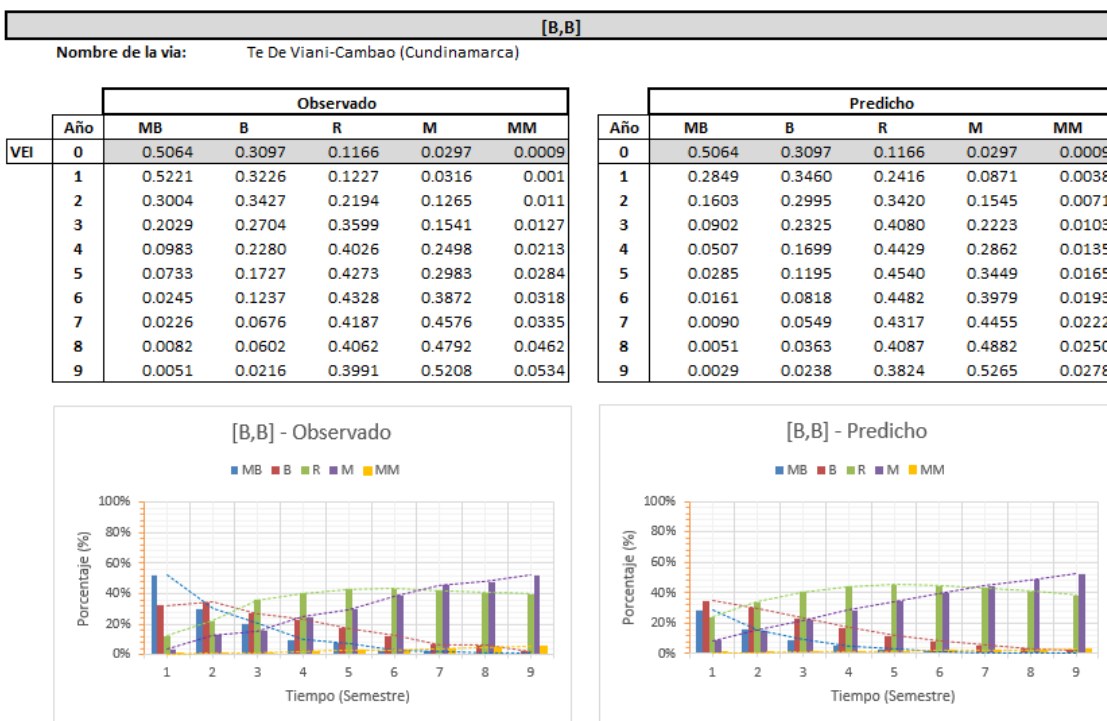


Figura 6.17: Comparativa entre las predicciones y los datos observados para el escenario [B,B], correspondiente a la vía **Te De Viani-Cambao (Cundinamarca)**.

6.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Es importante tener en cuenta que el análisis desarrollado en este documento se llevó acabo a nivel de red, ya que no se poseía información referente a las edades de las estructuras de pavimento ni de los espesores de las mismas que permitieran desarrollar modelos puntuales para cada sección de pavimento de manera particular. Por lo anterior los modelos propuestos en esta investigación recogen el comportamiento general de los pavimentos bajos las condiciones de tránsito y clima, parametrizadas en cada una de las nueve categorías generadas para este estudio.

Se generaron matrices de transición de probabilidad con base a las mediciones realizadas a través de Criterio Técnico del INVIAS. Dicha medición da como resultado el Índice Superficial de Estado (ISE) que se obtiene al ponderar las mediciones de diferentes tipos de daños por tramo. Esta calificación se compara con los umbrales establecidos y se asigna la categoría en la que se encuentra la vía. Con base a esta información se obtuvieron nueve matrices de transición de probabilidad, una para cada escenario, al combinar los tres niveles de temperatura considerados (Alto, Medio y Bajo) con los tres niveles de flujo vehicular considerados (Alto, Medio y Bajo).

Se obtuvieron matrices triangulares superiores, esto es, que no solo se consideró el cambio del estado de las vías (ISE) a la calificación inferior inmediata, sino que también se tuvieron en cuenta los cambios a otros estados inferiores. Se tomó la decisión de desarrollar matrices triangulares y no matrices bandeadas en el centro por dos razones: i) ofrecer más información sobre el comportamiento real de la pérdida de calidad de los pavimentos y ii) por observarse que en todos los escenarios la mayoría de los tramos tenían transiciones que se saltaban el estado inferior inmediato y que su deterioro también se distribuía en los otros estados subyacentes para el intervalo de medición.

El hecho de que las vías al deteriorarse se distribuyan en niveles inferiores más allá que al estado inmediatamente inferior, puede deberse a que la escala de tiempo tomada, que es de cada seis meses (periodicidad con la que se lleva a cabo la medición para el Criterio Técnico por parte de los Administradores Viales) es muy grande para capturar el deterioro gradual del pavimento, es decir, que el salto de las

categorías definidas por el INVIAS ocurre en un tiempo menor al de la medición, y por lo tanto es indetectable para esa metodología. También puede deberse a que en cada una de las nueve categorías se tienen tramos con características muy heterogéneas (tales como espesores de las capas estructurales, vida útil de diseño y edad del pavimento) y es probable que algunos de estos parámetros induzcan un deterioro más acelerado, afectando las transiciones dentro de las MTP definitiva.

Con las matrices creadas, se simuló el deterioro que sufriría la red correspondiente en perfecto estado para cada uno de los nueve escenarios. Se aprecia consistencia en la velocidad de deterioro en la Figura 6.4 donde se observa que la curva de calificación del estado de la vía en función del tiempo, decrece más rápido en el escenario donde la temperatura y el flujo vehicular son mayor, que donde estos dos factores son menores. Se concluye adicionalmente, que como se aprecia en la Tabla 6.8 el principal factor que impacta en la velocidad de deterioro de un pavimento, bajo los supuestos en los que se enmarca esta investigación, es el flujo vehicular, ya que para la misma categoría de flujo vehicular las variaciones del IC son mínimas en las diferentes categorías de temperatura.

En la Tabla 6.10 se presentan los valores promedios de las probabilidades de transición de estado (a nivel de red) de los nueve escenarios de Temperatura-TPD. Si bien la Tabla 6.10 no es una buena herramienta para fines predictivos, y mucho menos puede ser tomada como la MTP “general” para toda la red vial colombiana, es una forma práctica de visualización de las transiciones de estado de la red, asociadas a su probabilidad. Se observa que la probabilidad más baja (0.010) está asociada al hecho de que una red que se encuentra con una calificación de “Mal” estado pase a “Muy Malo”, así como que la probabilidad más alta (1.0) está asociada al hecho de que una red que se encuentra con una calificación de “Muy Malo” se mantenga en “Muy Malo”, lo cual es obvio debido a que “Muy Malo” es la categoría más baja. También de la Tabla 6.10-b se pueden identificar tres grupos de transiciones de calificación con relación a su probabilidad: Baja probabilidad, transiciones de M-MM a MB-R; Media probabilidad: R-M a MB-MB; y Alta probabilidad: B-B a MM-MM.

Tabla 6.12: a) Valores promedios de las probabilidades de transiciones de estado a nivel de red de cada uno de los nueve escenarios de Temperatura-TPD generados. b) Transiciones de calificación y su probabilidad. La escala de colores se emplea con el fin de facilitar la visualización de la magnitud de los valores. Verde para el mayor valor, que es “uno” y rojo para el menor valor, que es “cero”.

	<i>MB</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>M</i>	<i>MM</i>
<i>MB</i>	0.4031	0.3188	0.1606	0.0910	0.0265
<i>B</i>	0.0000	0.6220	0.2652	0.1000	0.0128
<i>R</i>	0.0000	0.0000	0.7288	0.2576	0.0136
<i>M</i>	0.0000	0.0000	0.0000	0.9900	0.0100
<i>MM</i>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

a.

Transición de calificación	Probabilidad Promedio de transición
M-MM	0.0100
B-MM	0.0128
R-MM	0.0136
MB-MM	0.0265
MB-M	0.0910
B-M	0.1000
MB-R	0.1606
R-M	0.2576
B-R	0.2652
MB-B	0.3188
MB-MB	0.4031
B-B	0.6220
R-R	0.7288
M-M	0.9900
MM-MM	1.0000

b.

El análisis dinámico de tercer orden realizado a los datos de la simulación producto de la utilización de las matrices de transición de probabilidad generadas, a vías en perfecto estado, cuantifica de manera satisfactoria el grado de agresividad de cada matriz, mediante el valor del Índice de Criticidad (IC) del sistema. Este valor está en unidades de tiempo, y se relaciona con la velocidad de respuesta del proceso. Como se explicó anteriormente, el IC nos brinda información sobre qué tan rápido se deteriora una vía, vinculada a una MTP. Es por esto que la matriz correspondiente al escenario [A,A] presenta un valor de IC=143.33, más pequeño que el valor de IC del resto de los escenarios, y el escenario [B,B] tiene un IC= 633.52 mayor que el valor de IC del resto de los escenarios. Es importante aclarar que las unidades del IC son las mismas que la periodicidad de medición de los datos con los que se construye la MTP, para este caso, semestres, pero como se comentó anteriormente, en esta investigación no se le da interpretación física al IC, sino más bien se toma éste como un parámetro comparativo, que dependiendo de su valor nos permite contrastar matrices de transición de probabilidad y jerarquizarlas según la velocidad de deterioro de la red a la que están asociadas.

Se realizaron comparaciones entre el estado medido de una vía correspondiente a cada uno de los nueve escenarios y las predicciones arrojadas por su MTP asociada. Se observó, como se muestra en las Figuras 6.10 a 6.17, que las MTP generadas son capaces de predecir con gran fidelidad la tendencia general y el comportamiento de la distribución de estados de la vía a largo plazo, es decir cuando el sistema se acerca o alcanza su estado de estabilización, pero presenta algunas deficiencias al intentar predecir la distribución de estados a corto plazo, principalmente en los escenarios de alto tráfico. Esto puede deberse a que se necesitan intervalos de tiempo más cortos que permitan capturar la tendencia general del deterioro en los primeros años de uso, ya que como se encontró en esta investigación, el factor más influye en la velocidad de deterioro de un pavimento es el flujo vehicular. Además, hay que recordar que, al ser un análisis a nivel de red, era de esperarse que las bondades predictivas de las MTP presenten mayor robustez cuando el sistema se estabiliza.

7. MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL PARA DIFERENTES TIPOS DE DAÑO DEL PAVIMENTO

7.1. GENERALIDADES

Luego de desarrollar modelos probabilísticos que permiten predecir la evolución en el tiempo del puntaje del Criterio Técnico a nivel de red, se procedió a la estimación de modelos lineales para cada uno de los fenómenos de deterioro considerados en la evaluación del estado de las vías a través del Criterio Técnico llevado a cabo por los Administradores Viales. Se tuvieron en cuenta solo deterioros que afectan las características superficiales del pavimento tales como Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamientos y Otros daños.

Para la generación de estos modelos se mantuvo la misma categorización empleada para las matrices de transición de probabilidad, explicada anteriormente, que considera nueve categorías al cruzar los tres posibles escenarios de temperatura (Alta, Media y Baja) y los tres posibles escenarios de Tránsito Promedio Diario (Alto, Medio y Bajo). La generación de modelos lineales se realizó basado en la “Metodología de Ventanas”, que permite construir la curva de evolución del comportamiento de un pavimento a partir de datos de deterioro observados a distintas edades en vías con características similares, en este caso temperatura y tránsito (Videla et al, 1996). Esta es una metodología ampliamente usada, ya que permite contar con un espacio de inferencia más amplio y la posibilidad de integrar datos de mediciones en estudios anteriores con datos nuevos. Además, esta metodología permite realizar mediciones de los deterioros de los tramos en un plazo muy breve y por lo tanto puede evaluar una mayor cantidad de tramos y categorías (De Solminihac et al, 1989).

Para la aplicación de esta metodología, el primer paso consiste en definir sectores de vías homogéneos en cuanto a sus variables más representativas, en el caso de esta investigación, nueve categorías según tránsito y temperatura. En segunda instancia, dentro de cada una de estas categorías se toman diferentes tramos, cada uno de estos tramos se considera entonces una “ventana” en la curva de comportamiento, que junto con otras “ventanas” (Tramos individuales similares)

puedan modelar el comportamiento de cada deterioro del pavimento (Videla et al, 1996). Esta metodología tiene como espíritu el supuesto de linealidad del comportamiento de cada uno de los procesos de deterioro y al no tenerse información alguna de las edades de los pavimentos, se asume que mayores mediciones de deterioro están asociadas a una mayor edad del pavimento que se está modelando.

7.2. REGRESIÓN LINEAL SIMPLE

La regresión lineal o ajuste lineal hace referencia a una metodología matemática utilizada para generar modelos que permitan establecer la relación existente entre una variable dependiente o respuesta (Y) con respecto a variables independientes o explicativas (X_i) y un término aleatorio o error. Este tipo de modelos tiene la forma genérica que se presenta en la Ecuación 7.1:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n + e \quad (7.1)$$

Los términos β_i corresponden a parámetros que miden la influencia de cada una de las variables explicativas involucradas en el modelo.

Es importante resaltar que este tipo de modelo considera diferentes supuestos que deben cumplirse para que estos puedan ser aplicados. Estos son:

- Los valores para las variables independientes X_i son fijos y medidos sin error.
- La variable dependiente Y es aleatoria, sus valores están normalmente distribuidos y son independientes estadísticamente.
- Para cada uno de los valores de las variables independientes X_i existe una distribución normal de valores de Y .
- Las varianzas de las subpoblaciones de Y son iguales y sus valores promedio están sobre el modelo de regresión.

Un caso particular de los modelos de regresión lineal, son los modelos de regresión lineal simple, en los cuales solo se considera una variable dependiente, por lo cual la ecuación de este tipo de modelos solo tiene dos parámetros de influencia (β).

Los modelos de regresión lineal simple tienen la forma genérica que se presenta en la Ecuación 7.2:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + e \quad (7.2)$$

Dónde:

β_0 : Es el intercepto de la línea con el eje Y.

β_1 : Es la pendiente correspondiente a la línea de regresión.

e : Corresponde al error aleatorio asociado con la medición del valor X_i , dicho error asume una distribución normal con media 0 y desviación estándar constante.

Un modelo de regresión lineal tiene como objetivo obtener estimaciones de los parámetros β_0 y β_1 para calcular la recta de regresión que se ajuste de la mejor manera posible a los datos.

Las hipótesis asociadas a un modelo de regresión lineal simple son:

- Linealidad: La relación existente entre X y Y es lineal.
- Homogeneidad: El valor promedio del error es igual a 0.
- Homocedasticidad: La varianza de los errores es constante.
- Independencia: Las observaciones son independientes.
- Normalidad: Los errores siguen una distribución normal.

En los modelos de regresión lineal simple, el intercepto β_0 indica el valor promedio de la variable de respuesta Y cuando la variable independiente X es igual a 0. Mientras que la pendiente β_1 indica la variación promedio en la variable de respuesta Y cuando X se incrementa en una unidad.

En esta investigación se desarrollaron dos tipos de modelos de regresión lineal: i) modelos libres y ii) modelos forzando el intercepto a cero. Los datos empleados para la estimación de los modelos provienen de las mediciones realizadas con la metodología del Criterio Técnico desde el primer semestre del 2006 hasta el primer semestre del año 2010, es decir que se tienen nueve periodos consecutivos de medición, ya que este tipo de evaluación se realiza semestralmente como se mencionó anteriormente.

El proceso anteriormente descrito se repitió para cada uno de los seis tipos de deterioro en cada una de las nueve categorías. Tanto los datos empleados para la generación de los modelos como la selección de las “ventanas”, no se presentan en el cuerpo de este documento por ser demasiado extensas y su explicación en totalidad resulta tediosa, no obstante, pueden ser consultadas en el “Anexo 1: Datos” que acompañan el presente documento. A continuación se presentan los diferentes modelos estimados (libres y forzados), de la Figura 7.1 a la Figura 7.18.

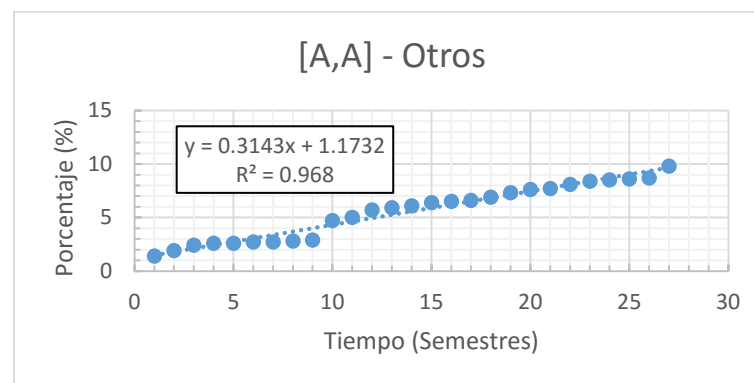
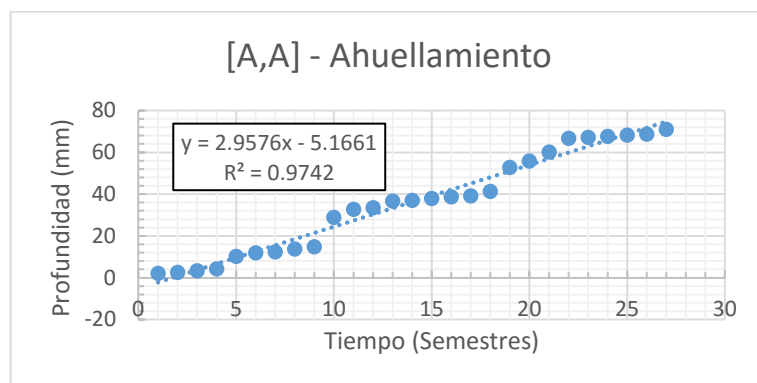
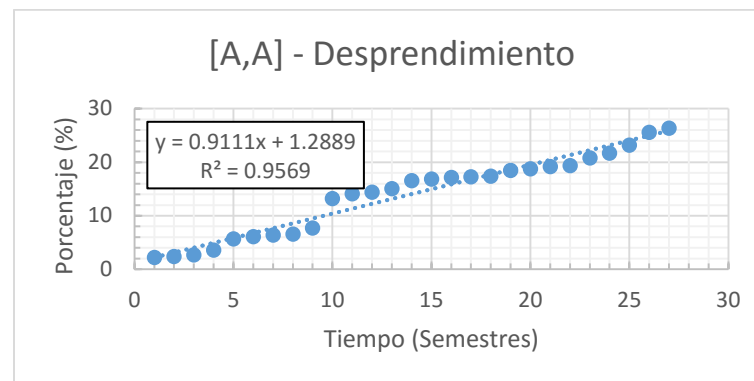
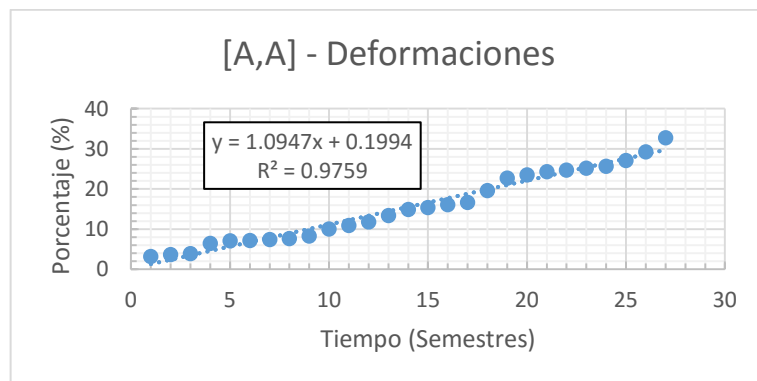
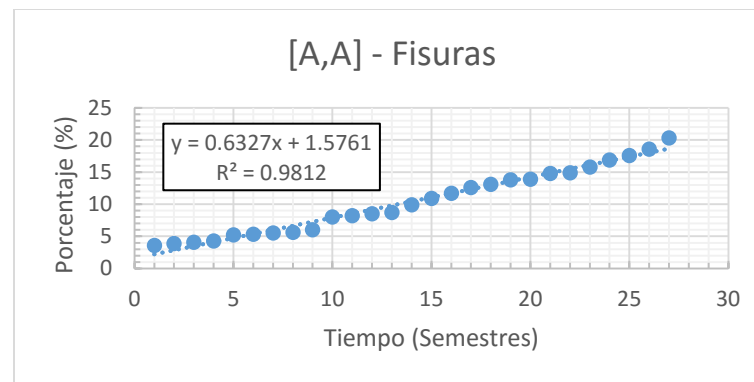
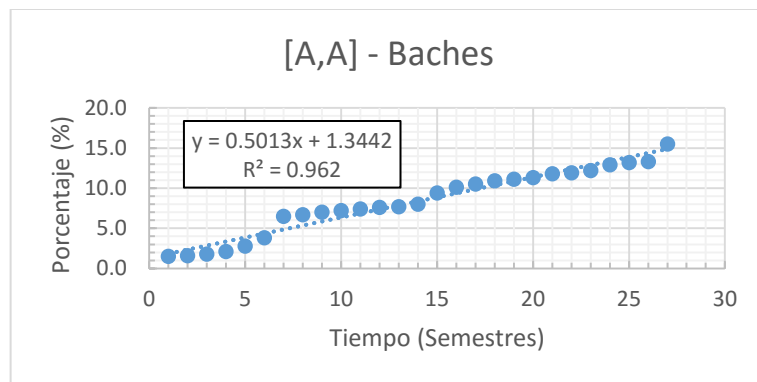


Figura 7.1: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [A,A], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

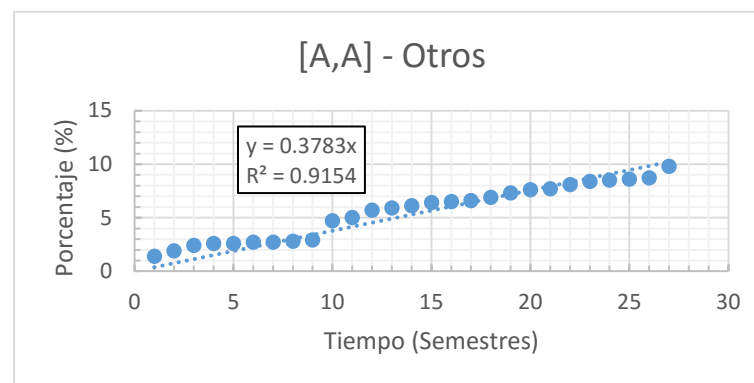
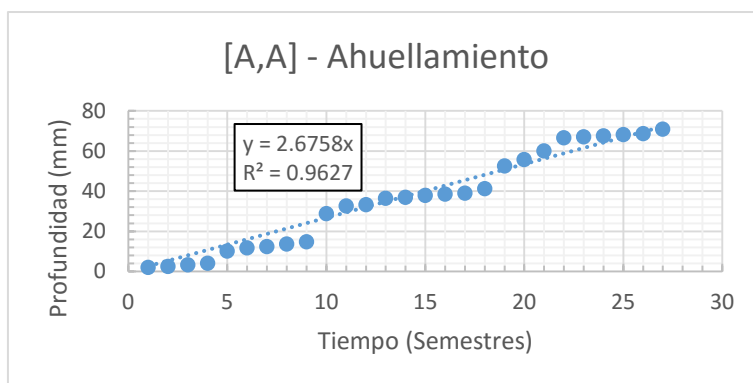
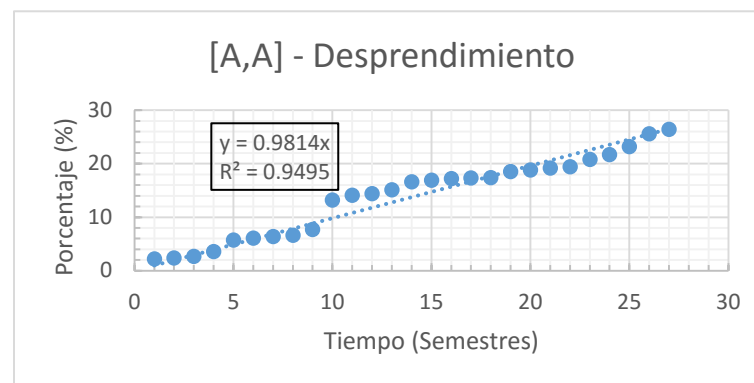
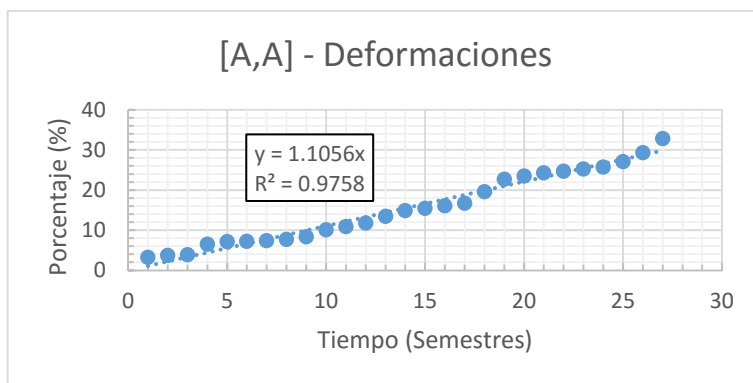
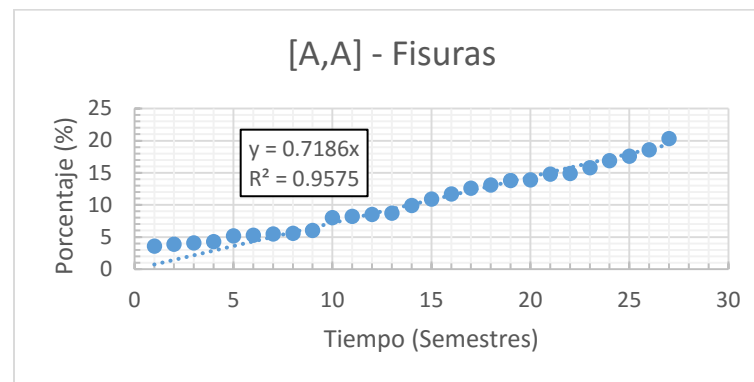
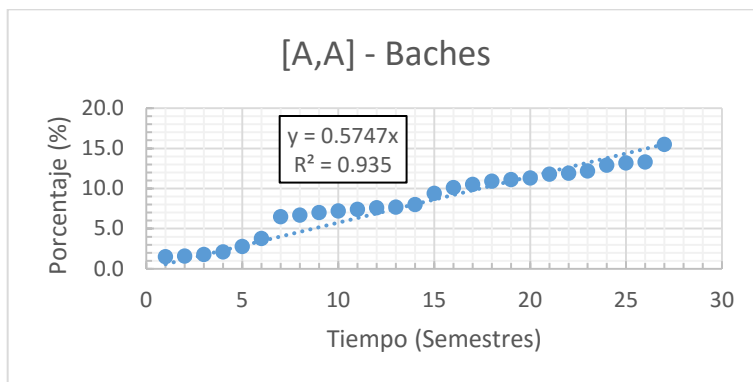


Figura 7.2: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [A,A], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

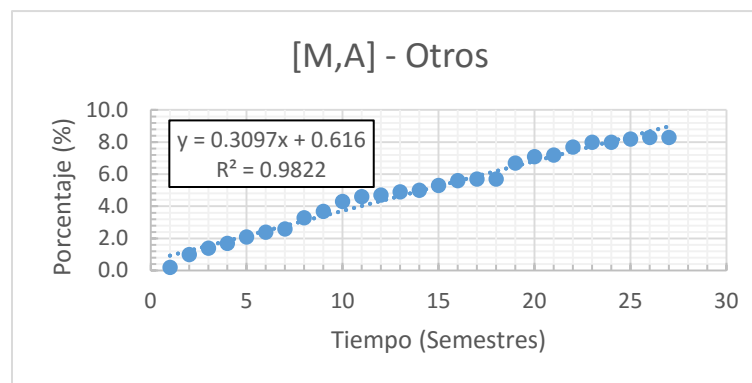
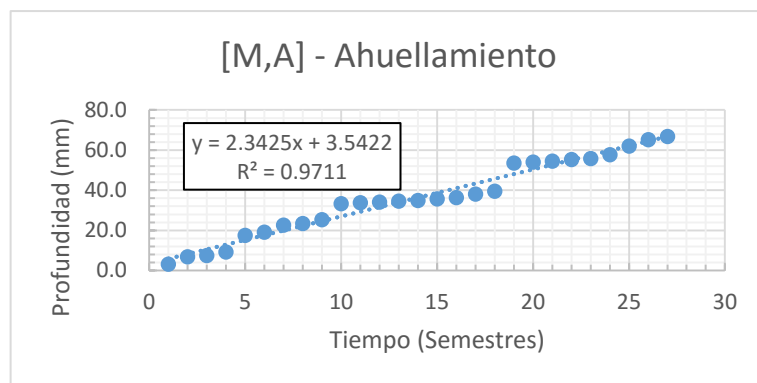
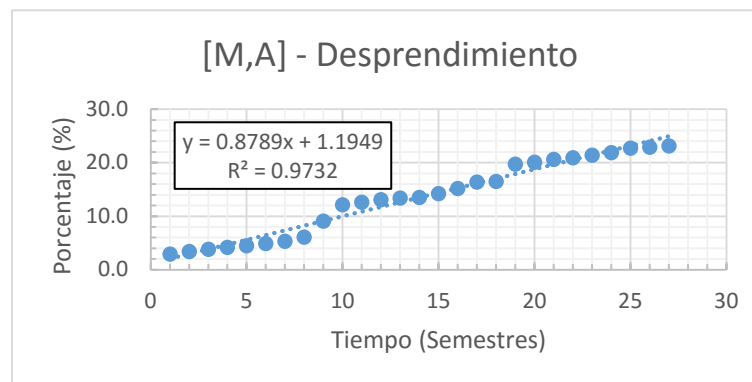
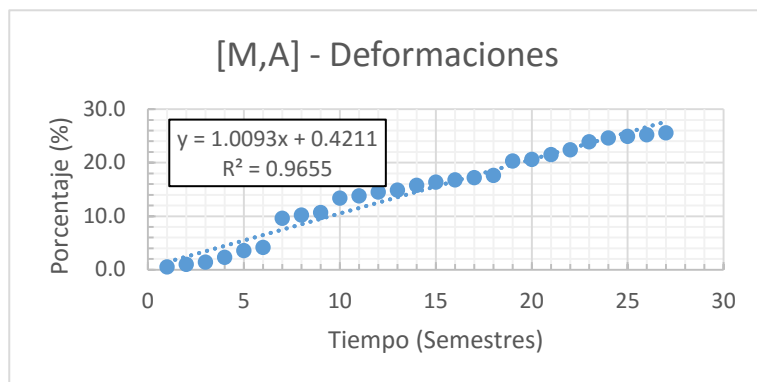
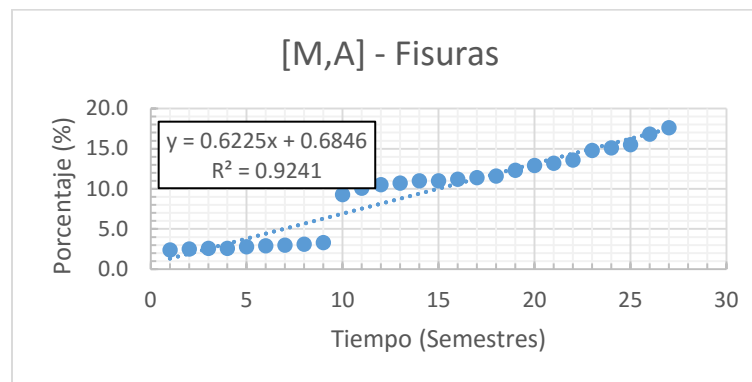
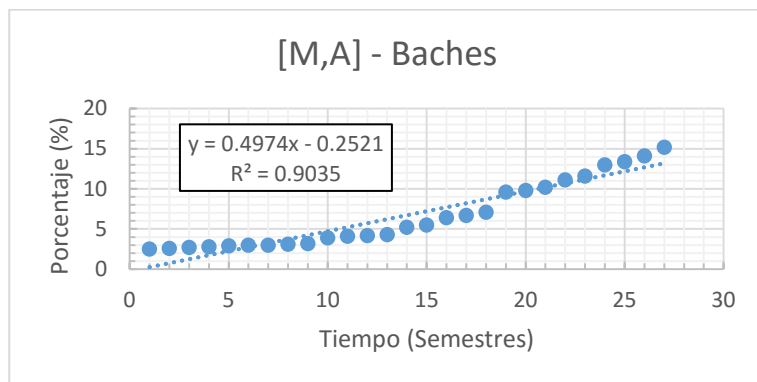


Figura 7.3: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [M,A], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

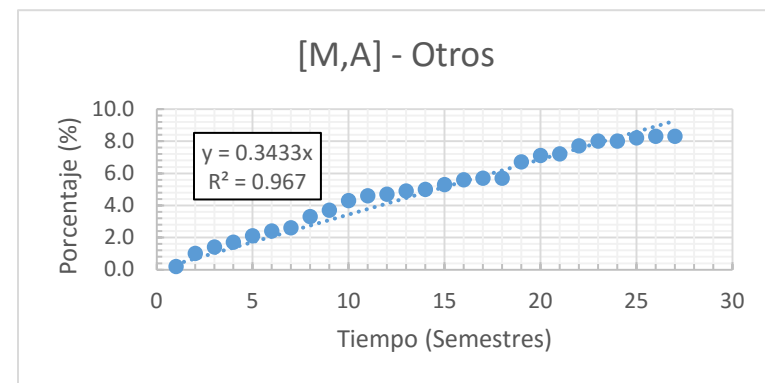
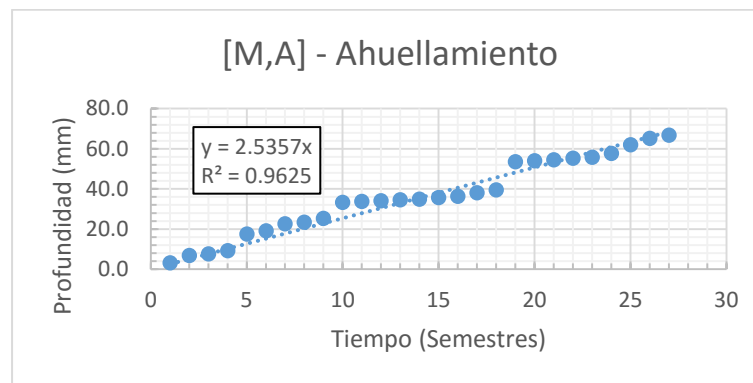
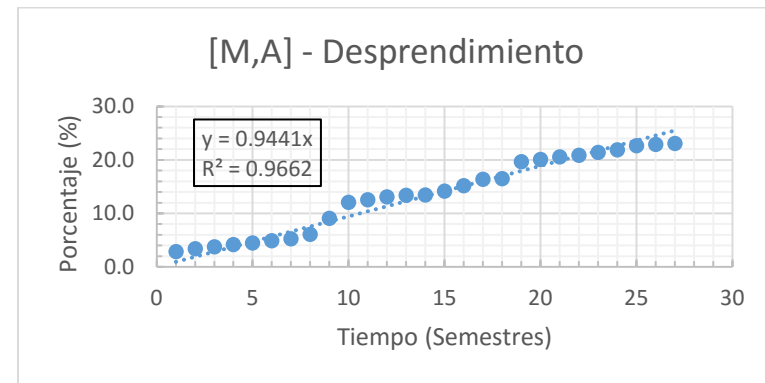
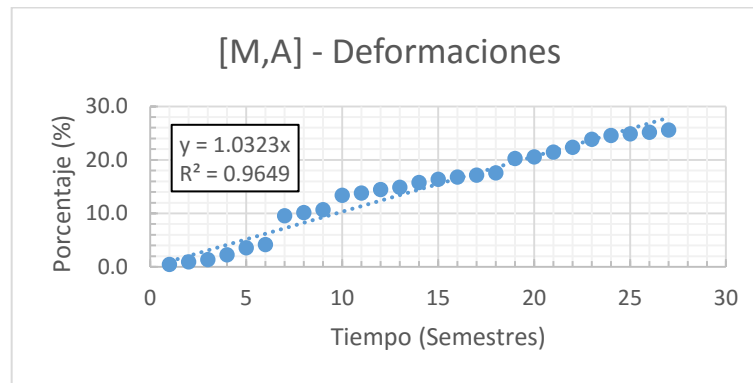
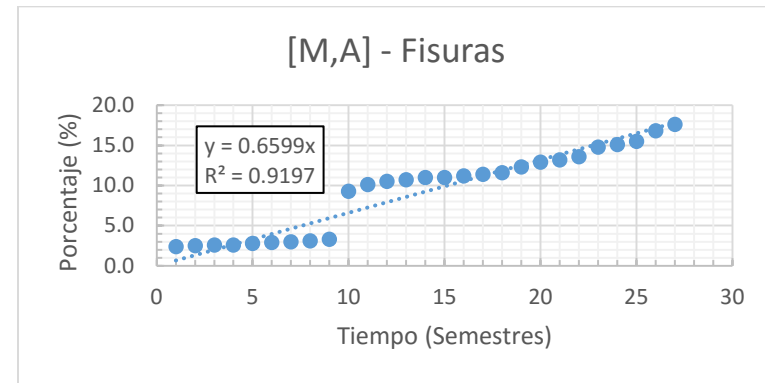
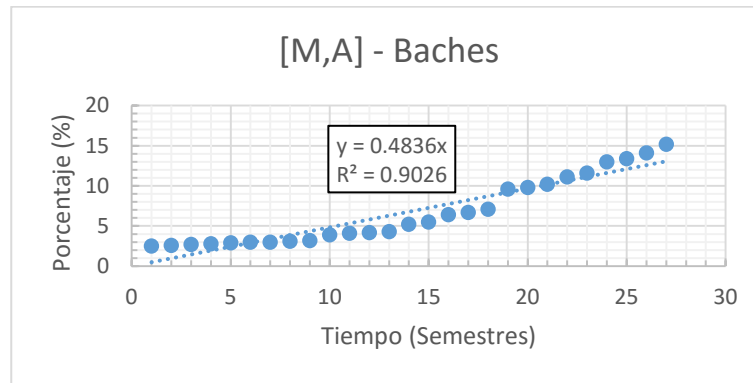


Figura 7.4: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [M,A], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

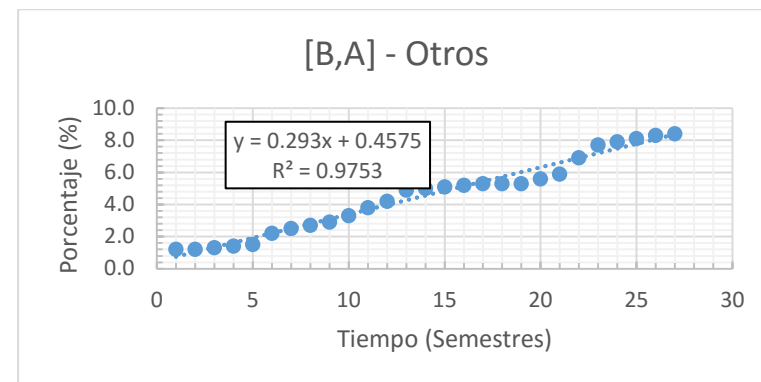
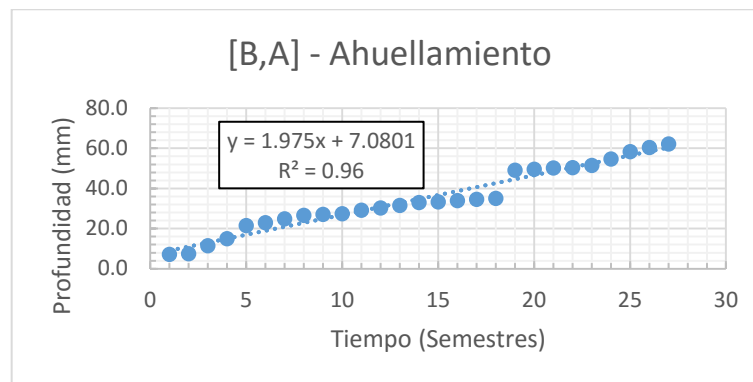
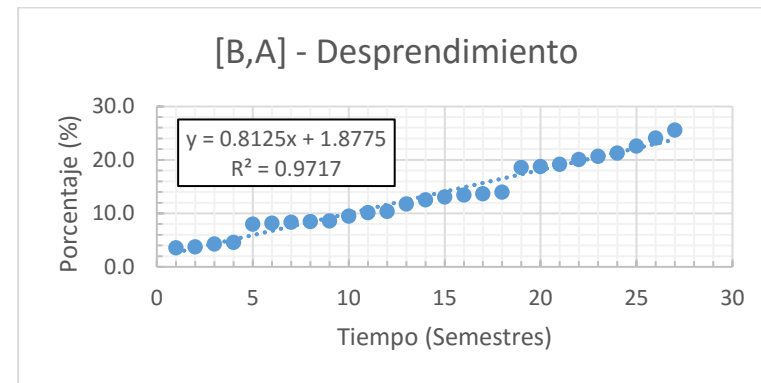
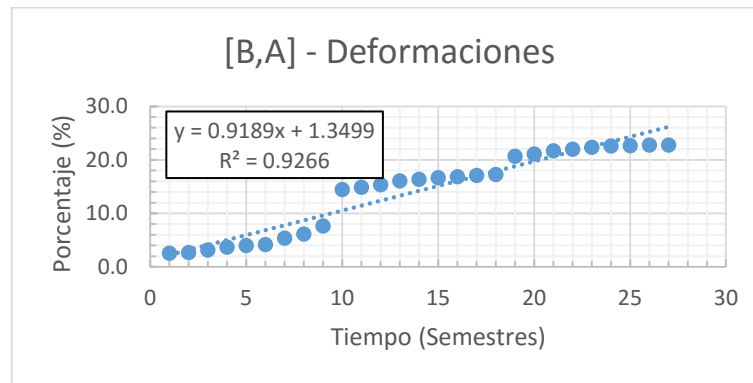
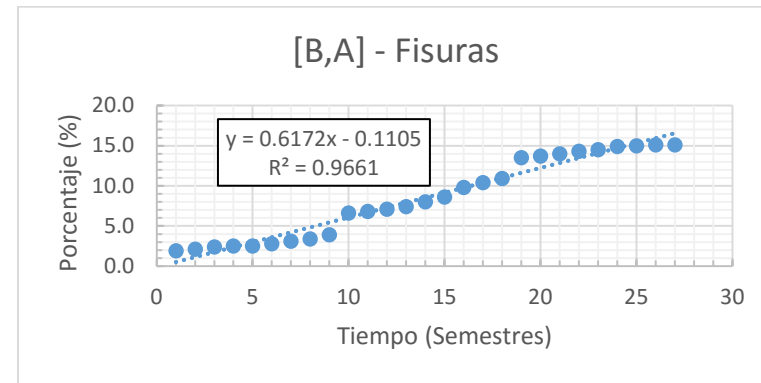
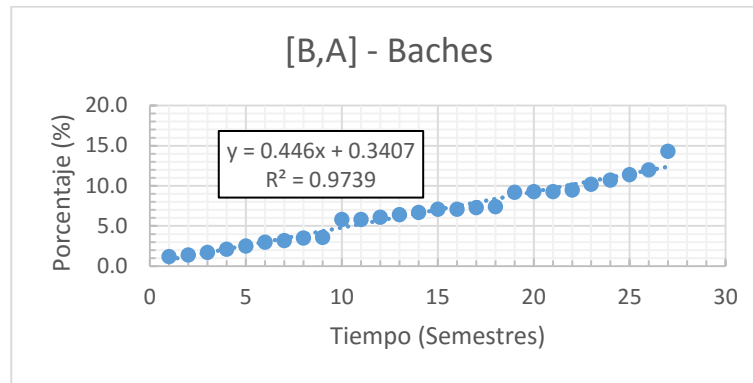


Figura 7.5: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [B,A], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

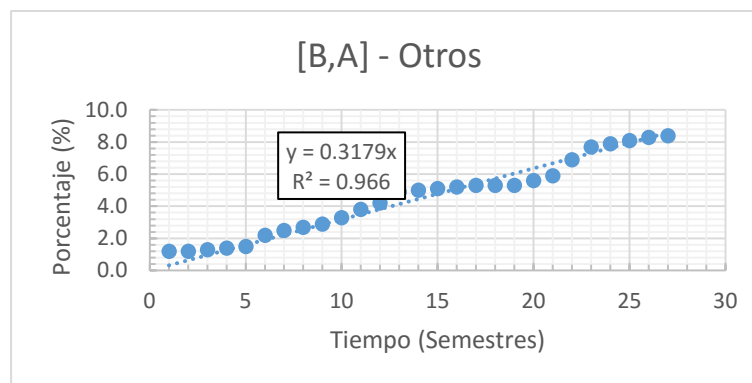
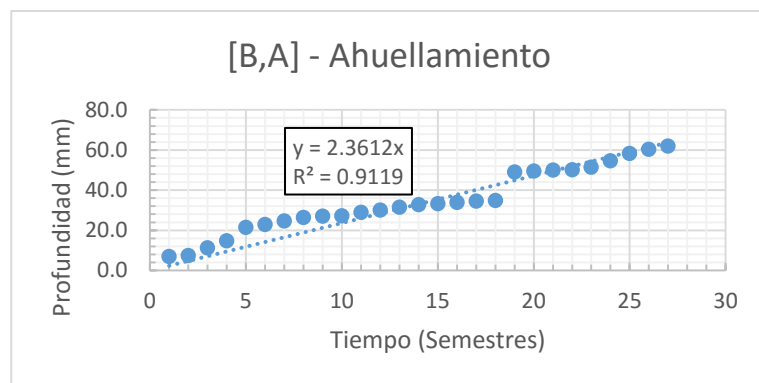
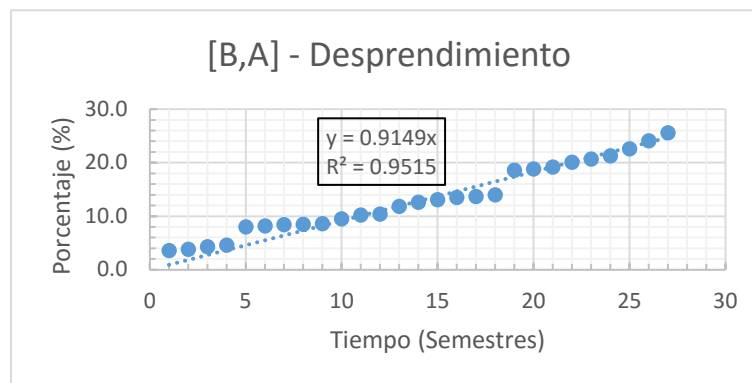
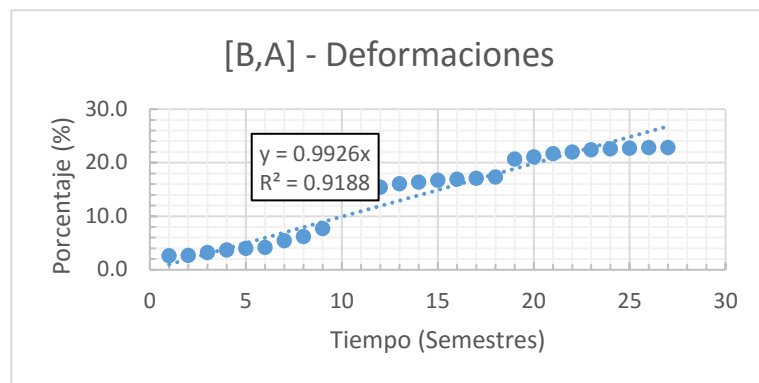
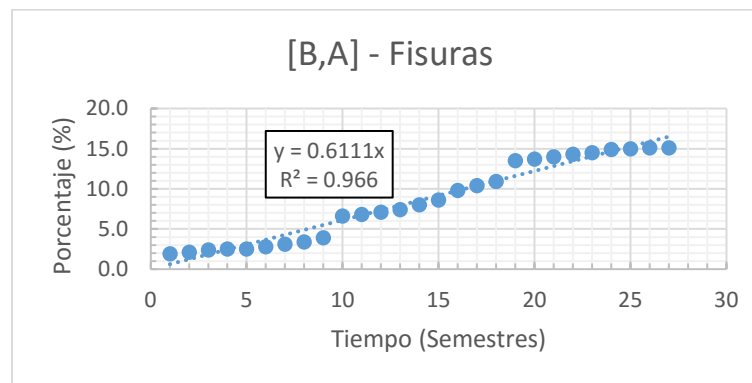
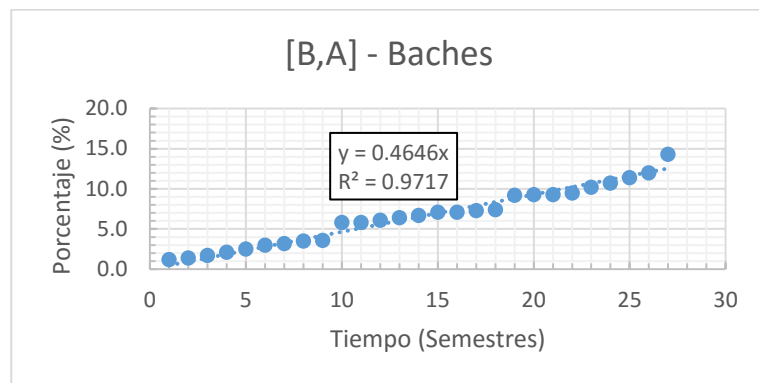


Figura 7.6: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [B,A], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

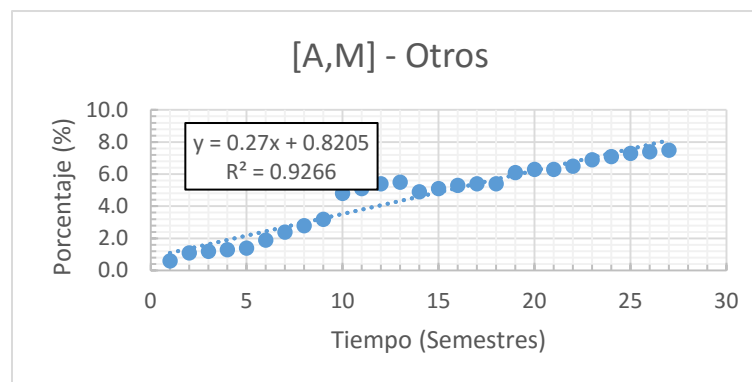
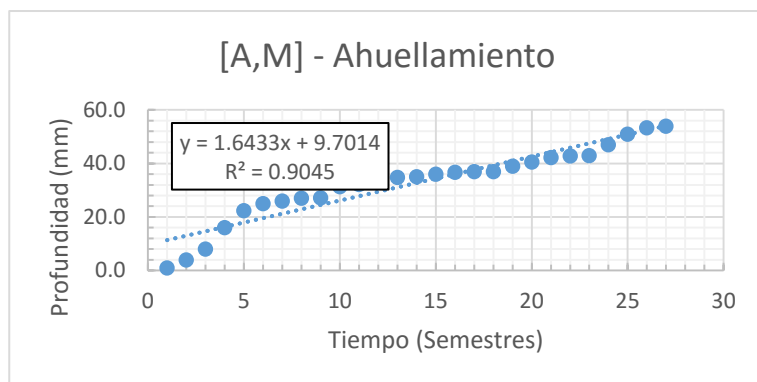
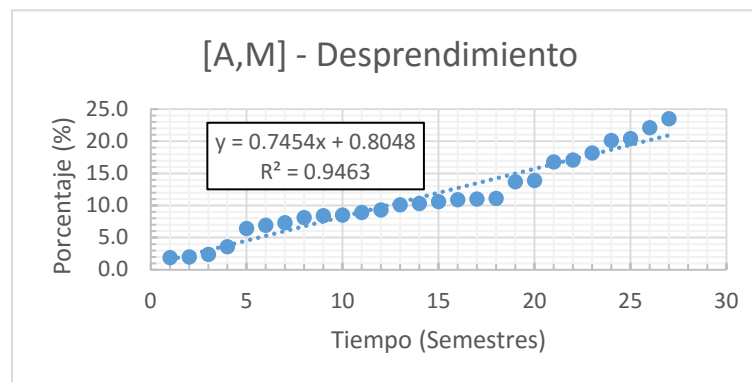
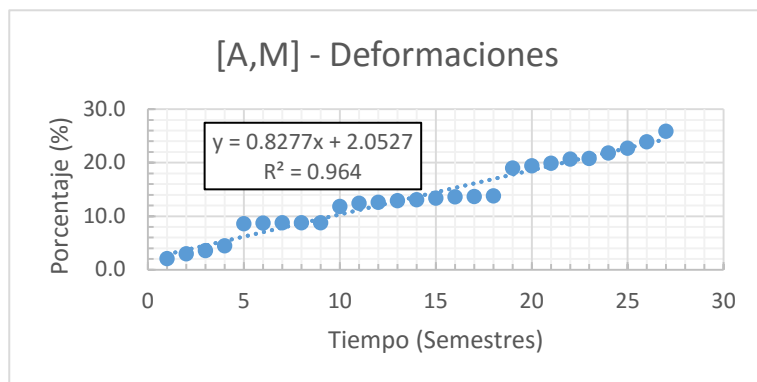
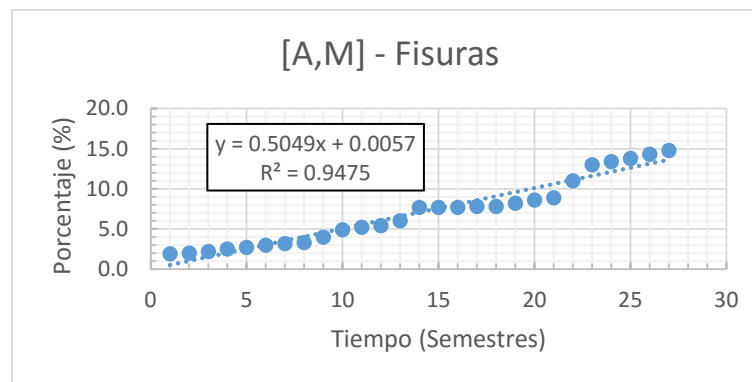
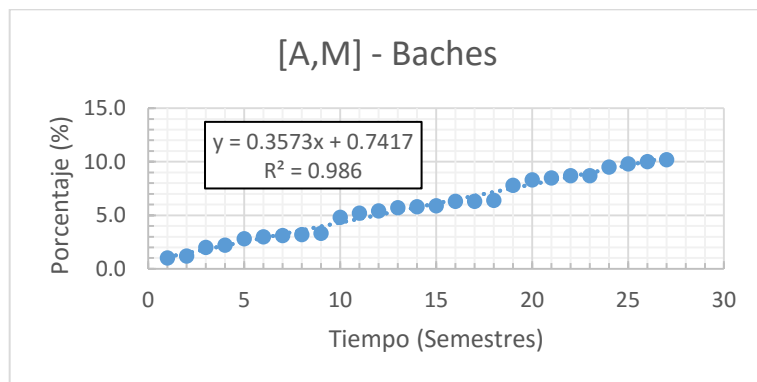


Figura 7.7: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [A,M], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

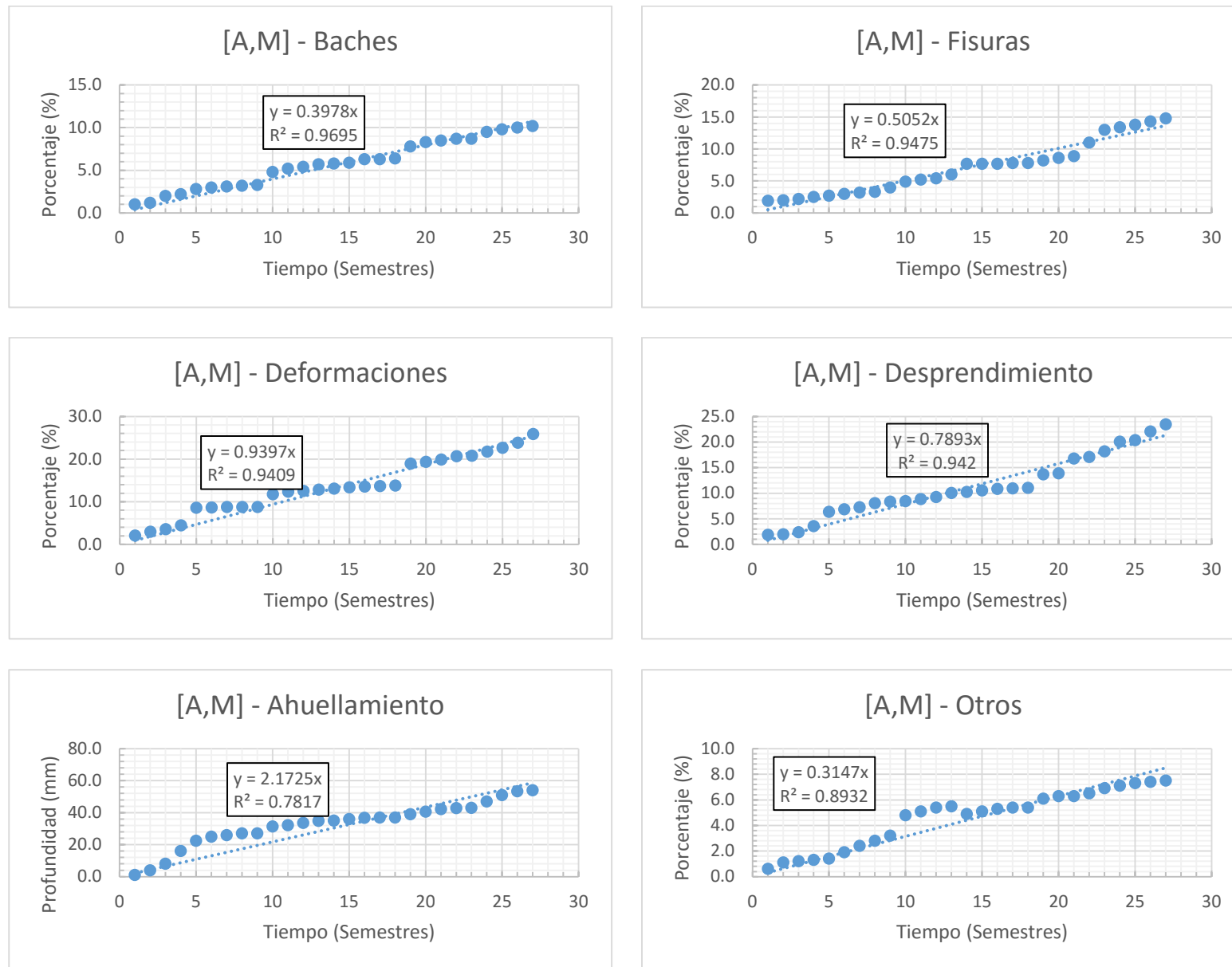


Figura 7.8: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [A,M], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

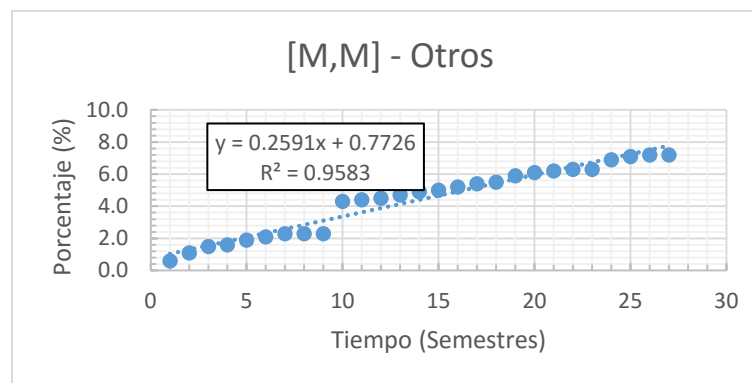
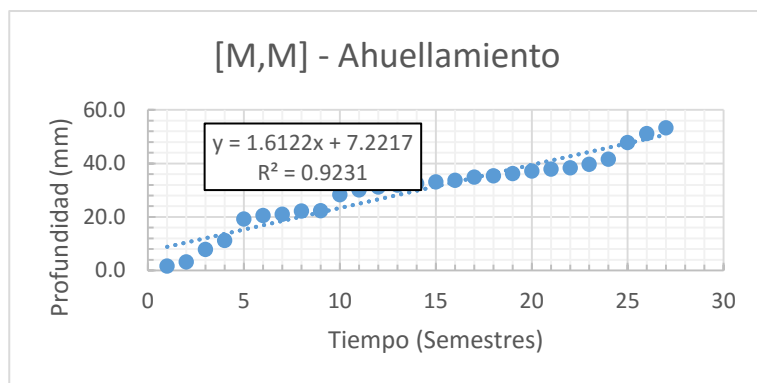
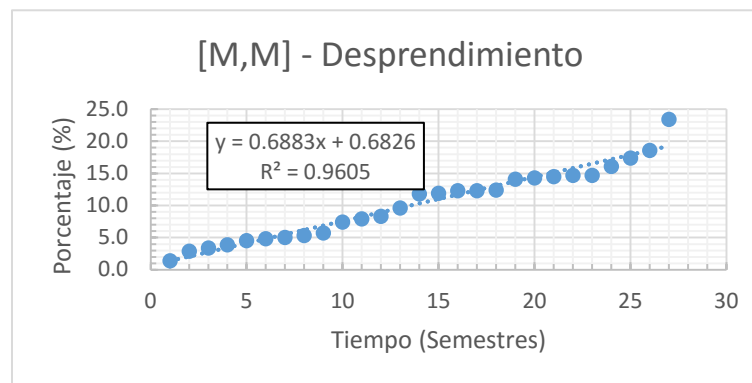
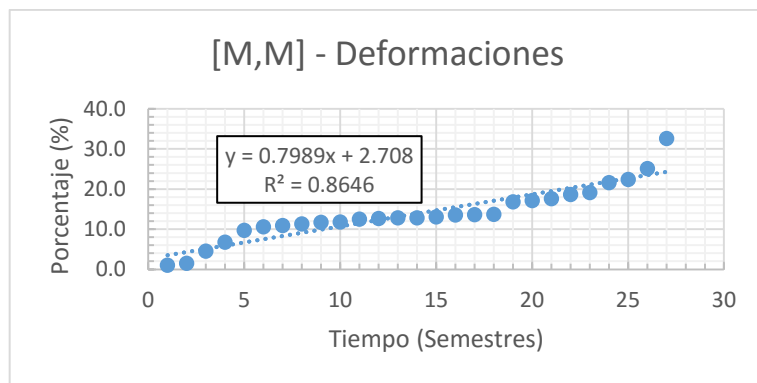
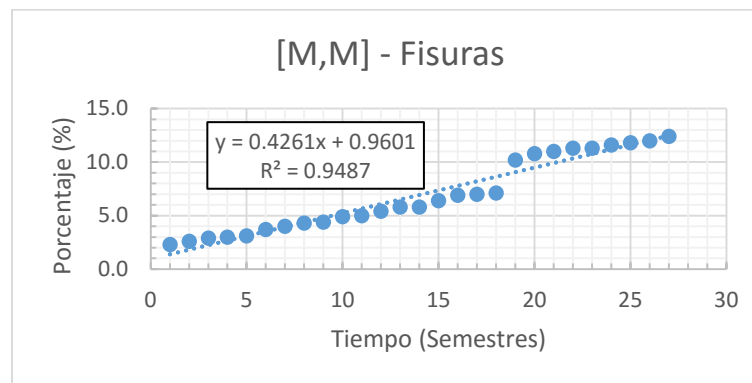
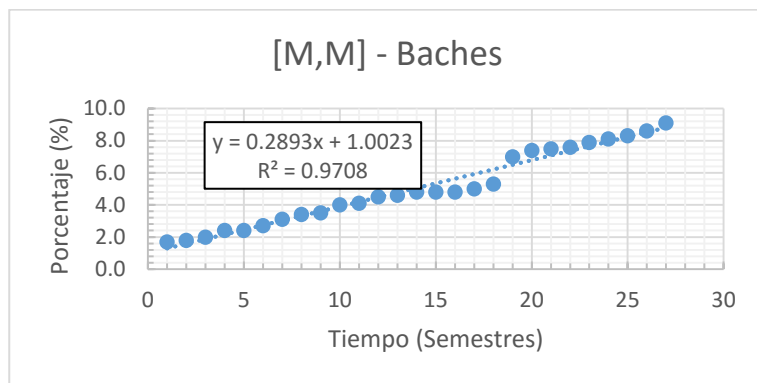


Figura 7.9: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [M,M], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

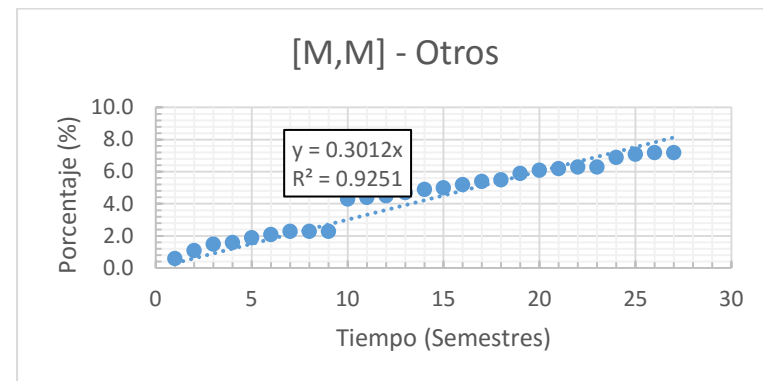
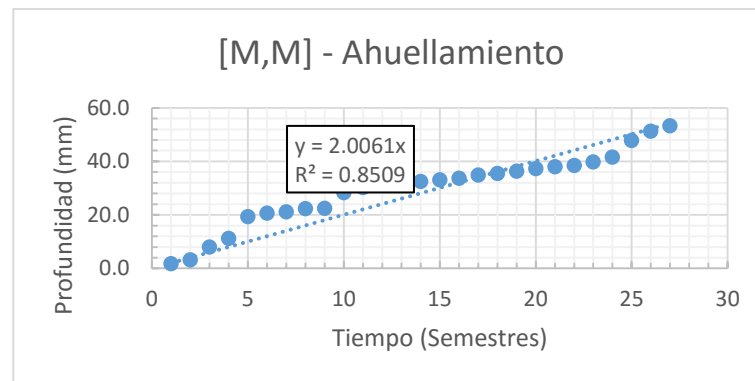
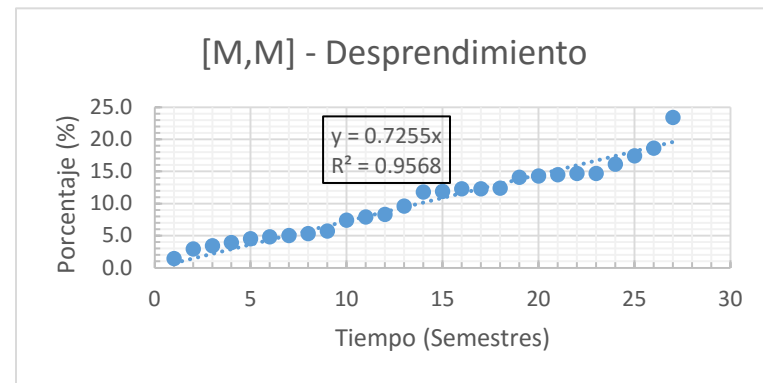
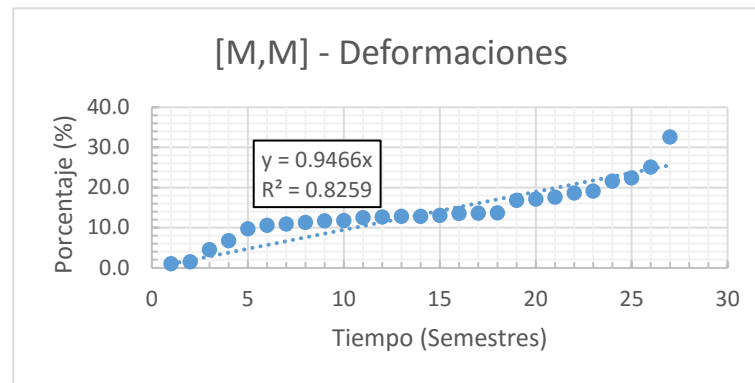
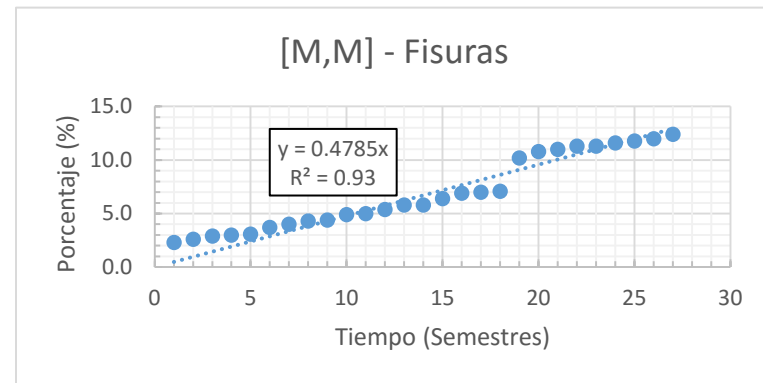
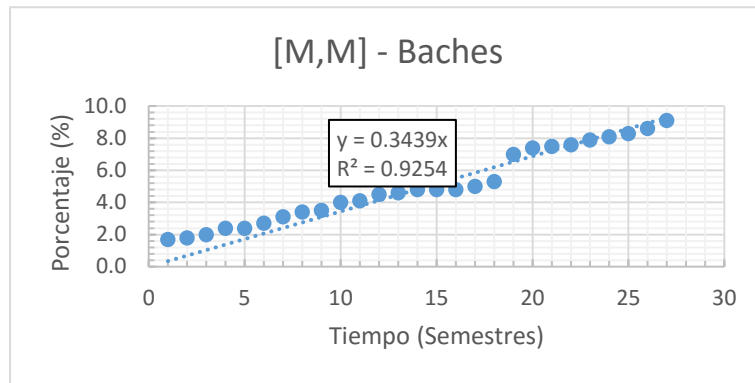


Figura 7.10: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [M,M], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

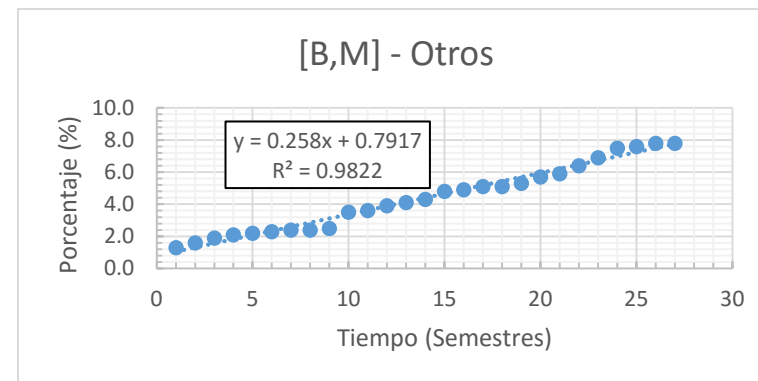
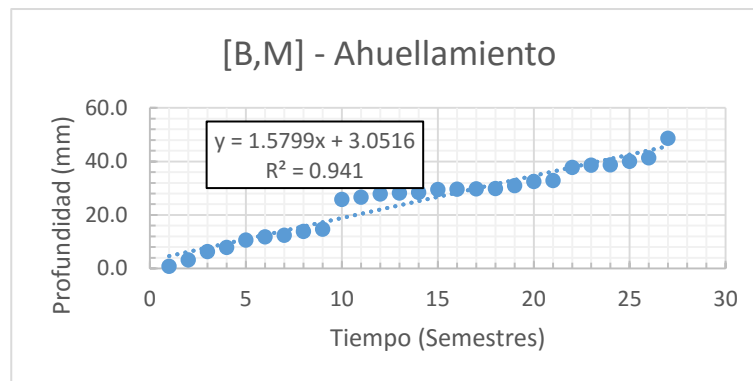
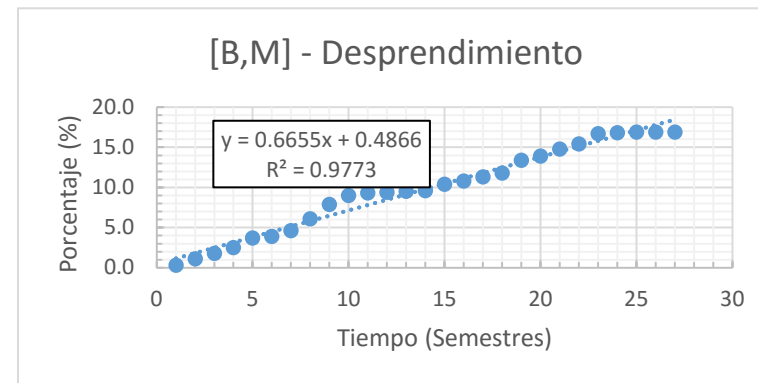
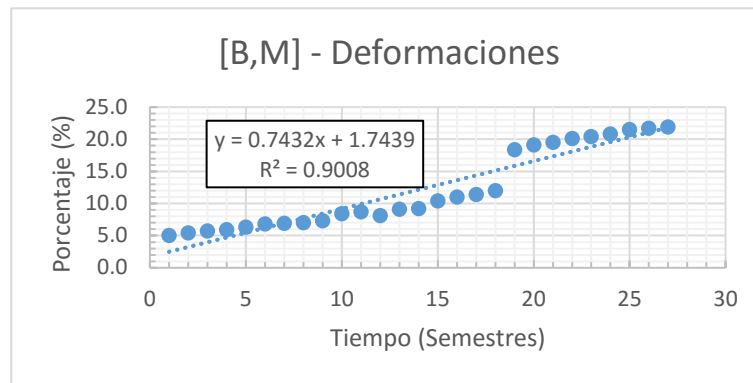
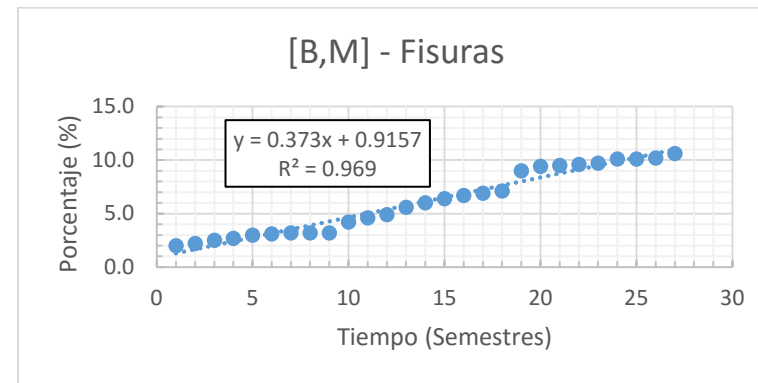
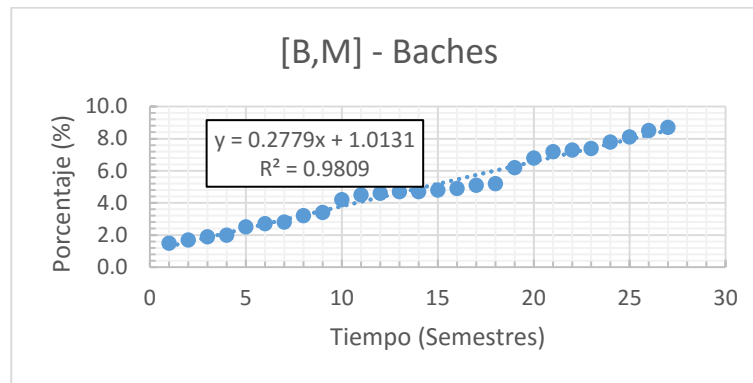


Figura 7.11: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [B,M], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

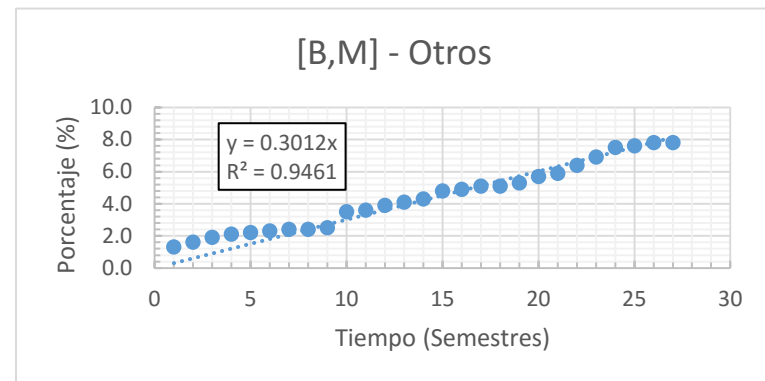
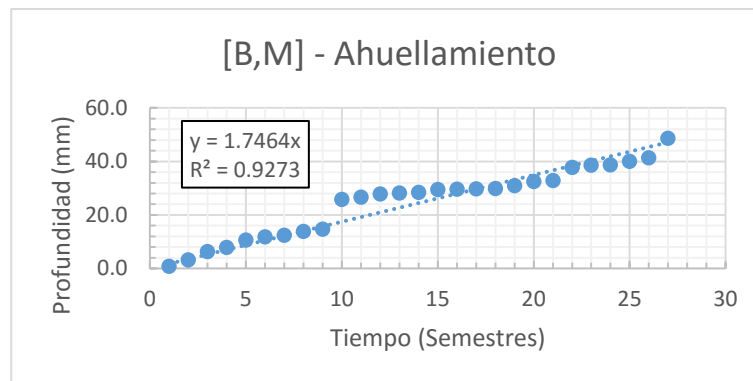
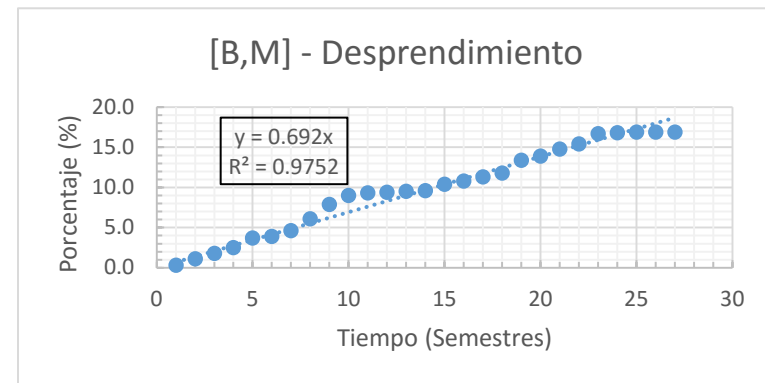
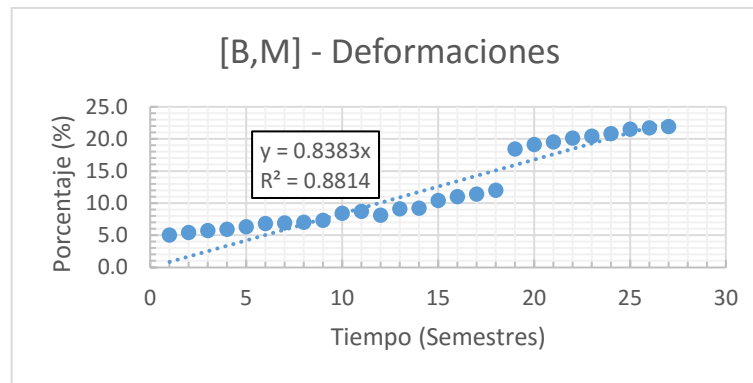
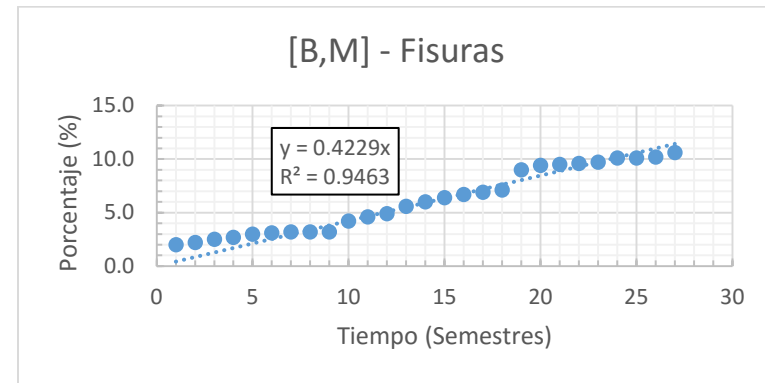
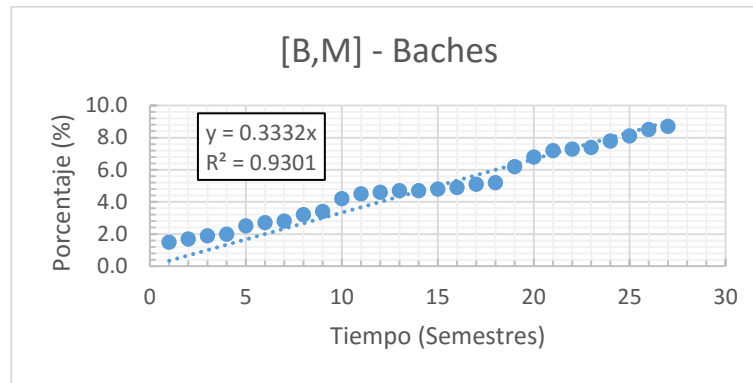


Figura 7.12: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [B,M], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

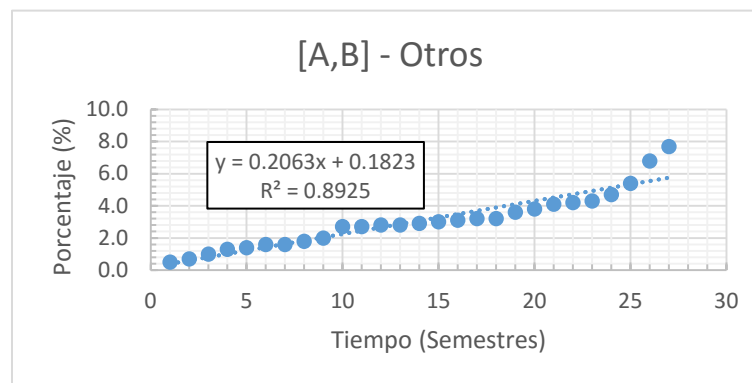
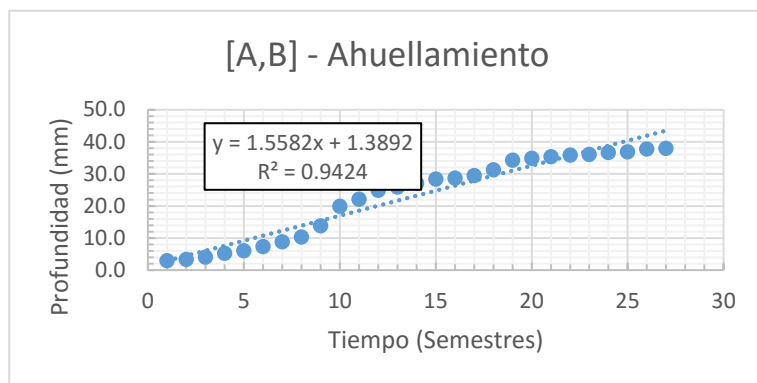
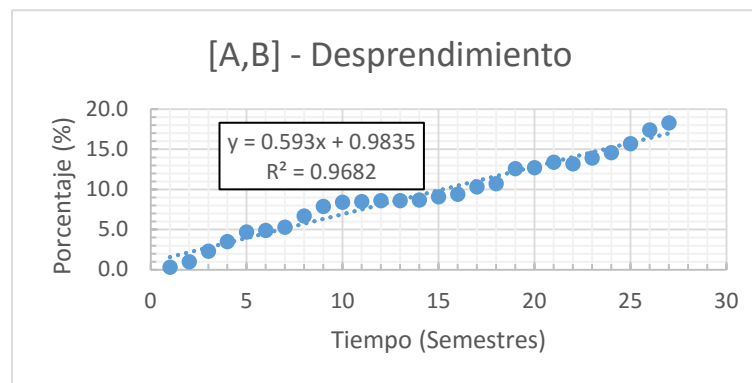
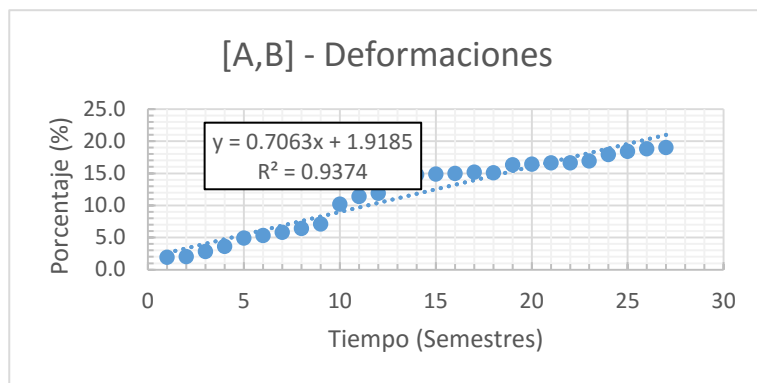
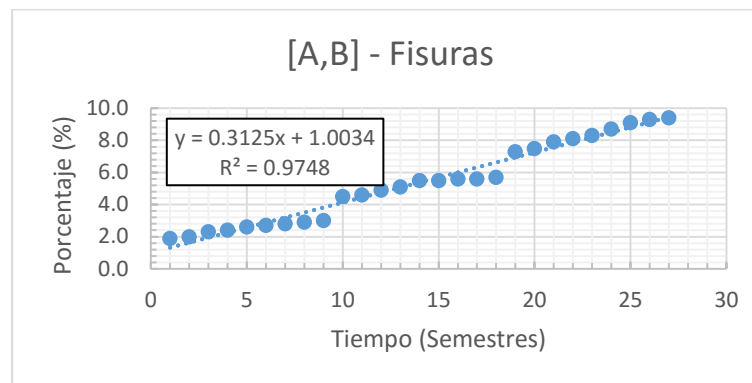
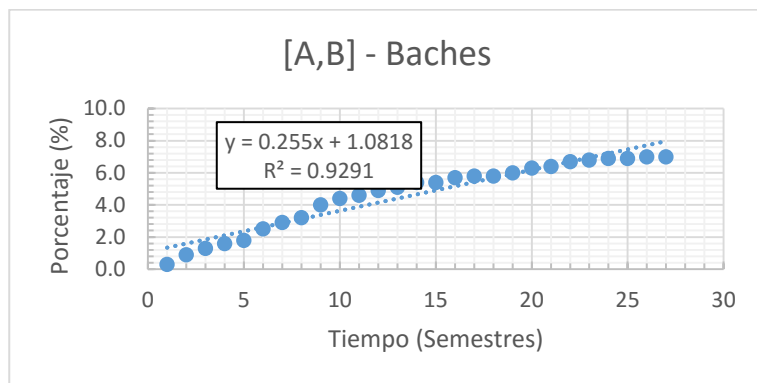


Figura 7.13: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [A,B], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

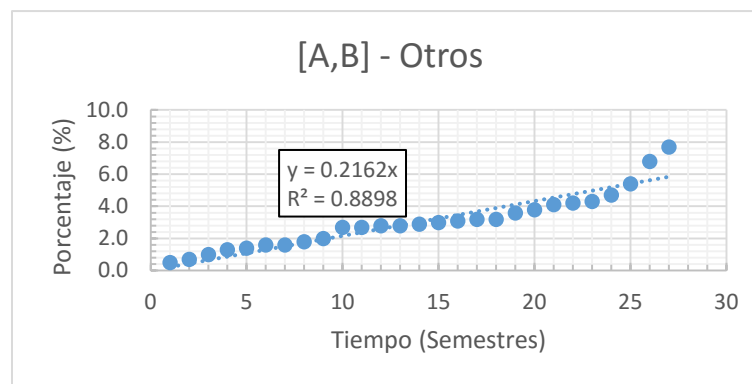
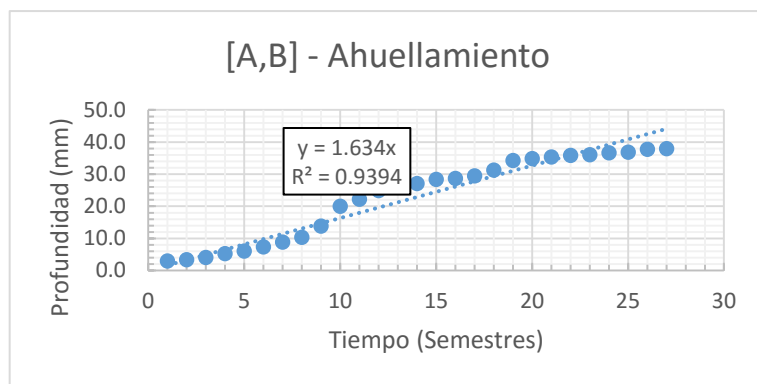
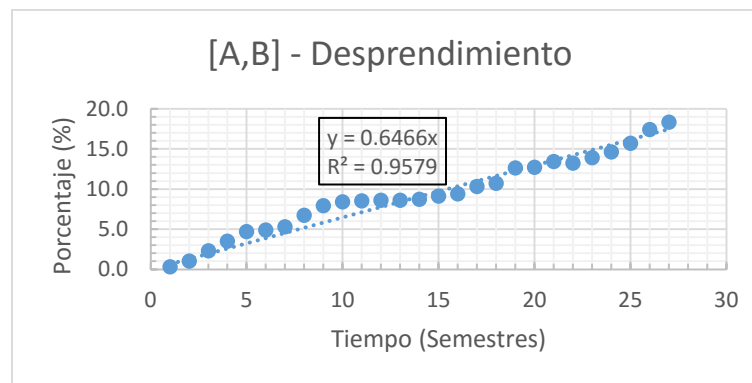
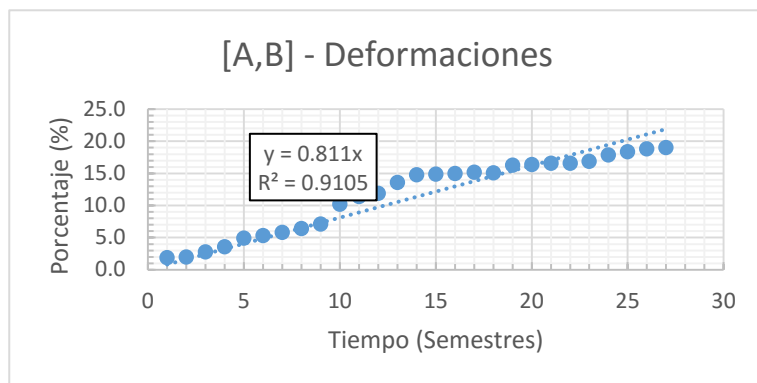
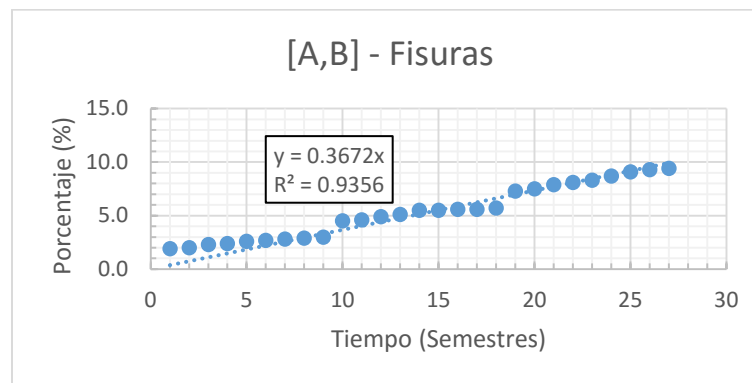
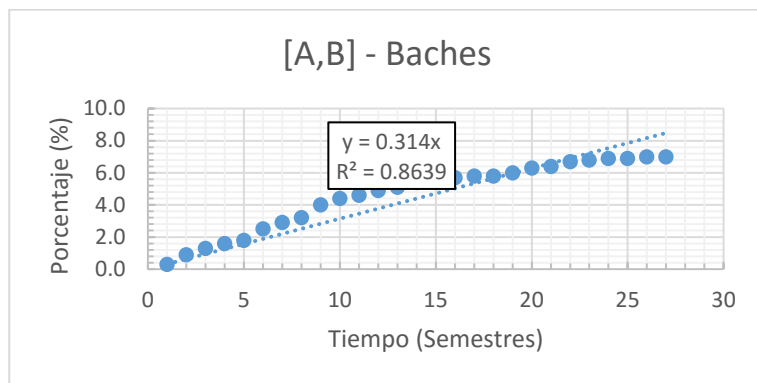


Figura 7.14: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [A,B], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

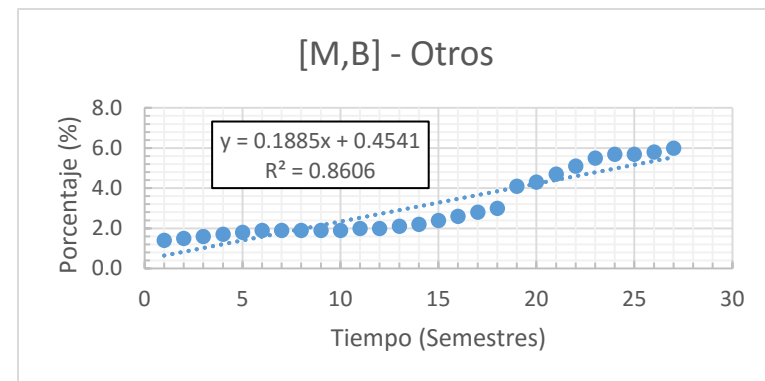
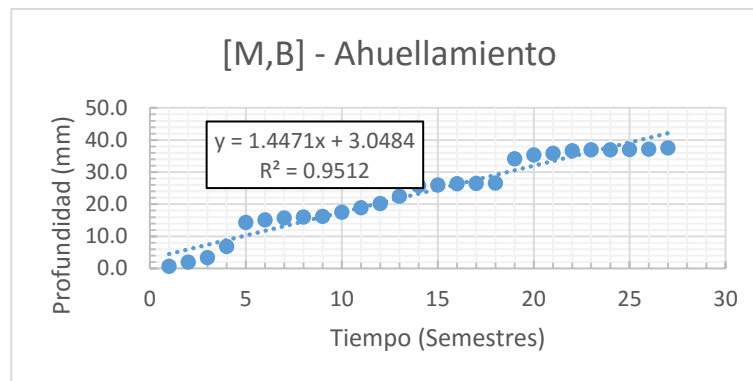
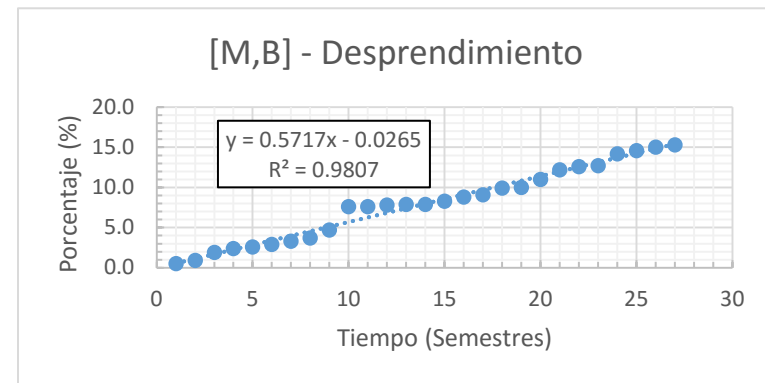
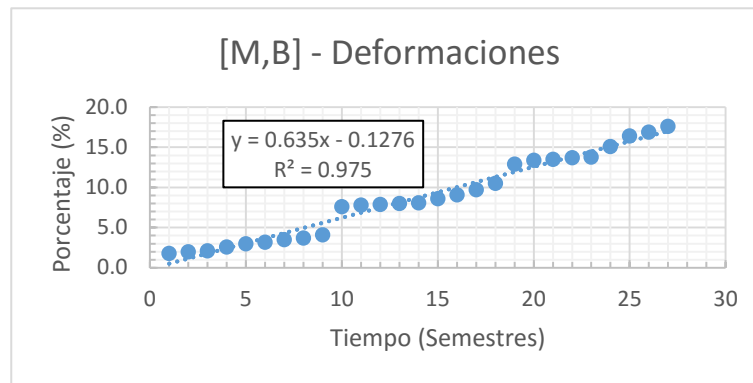
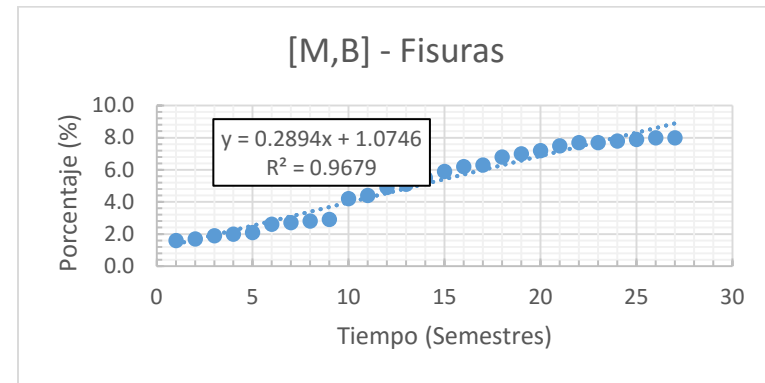
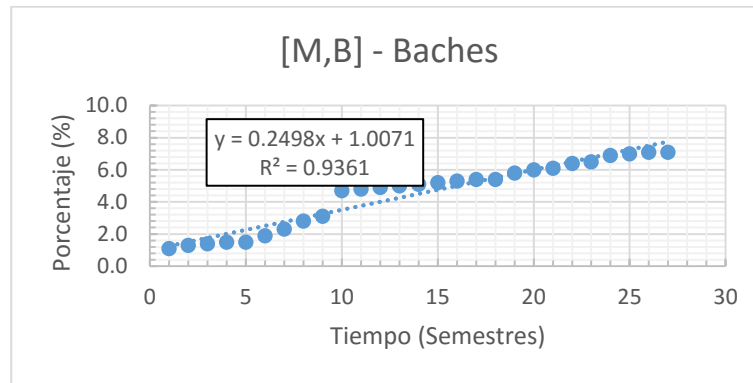


Figura 7.15: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [M,B], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

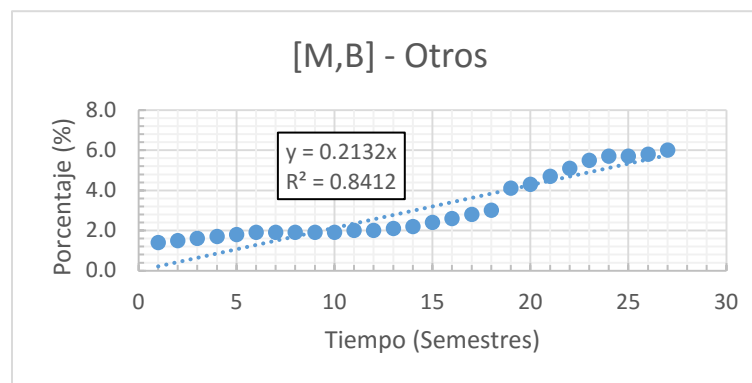
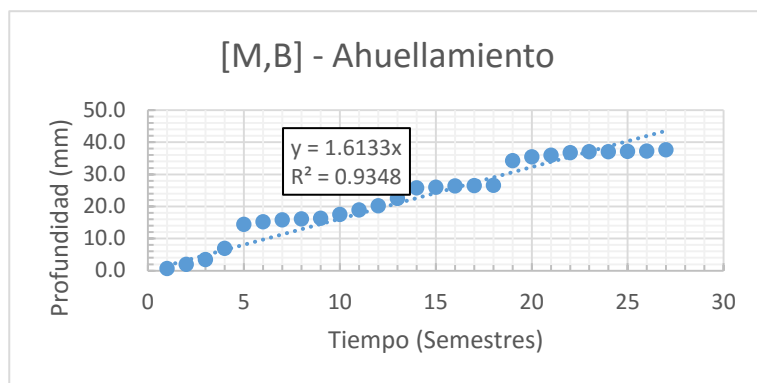
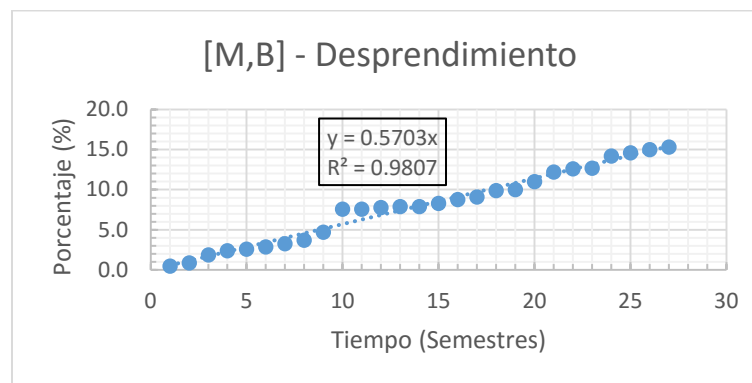
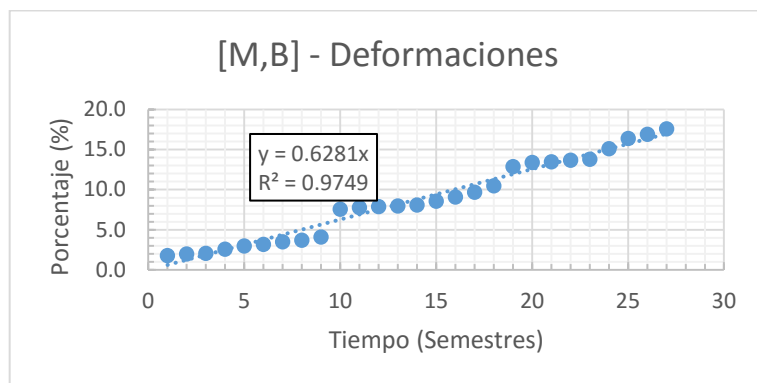
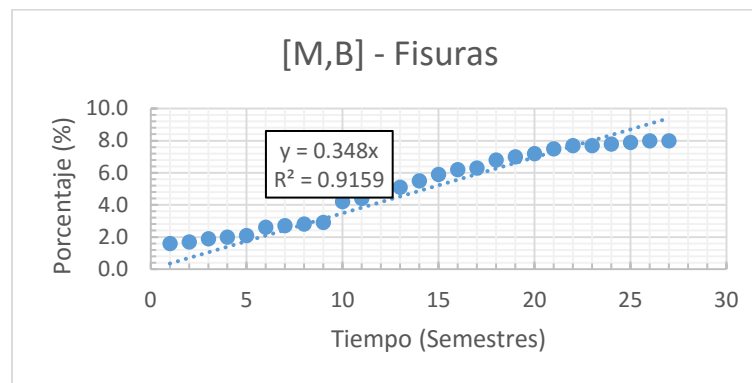
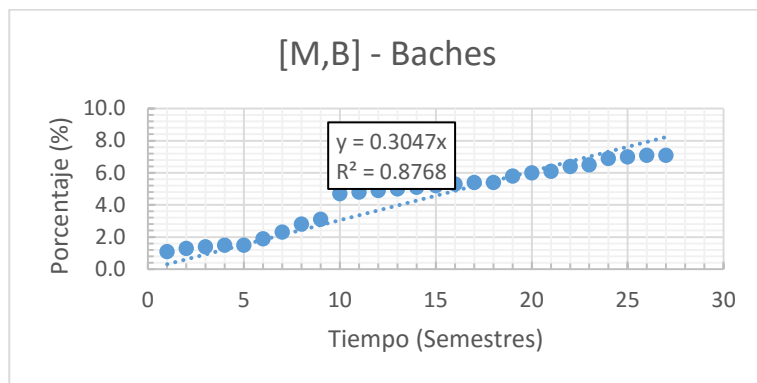


Figura 7.16: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [M,B], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

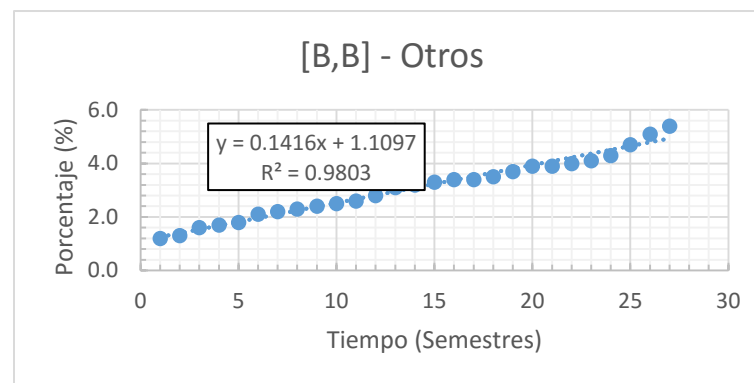
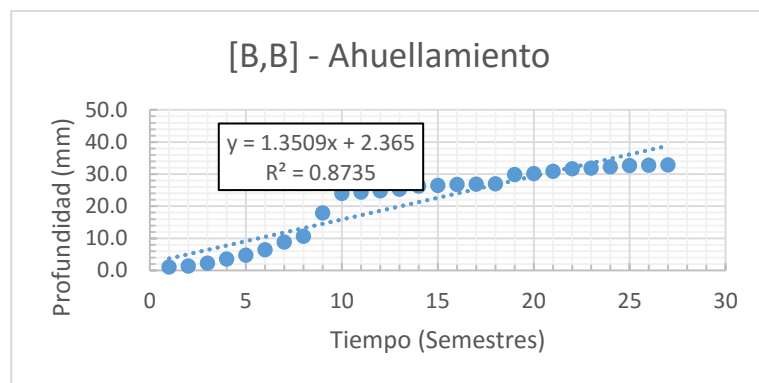
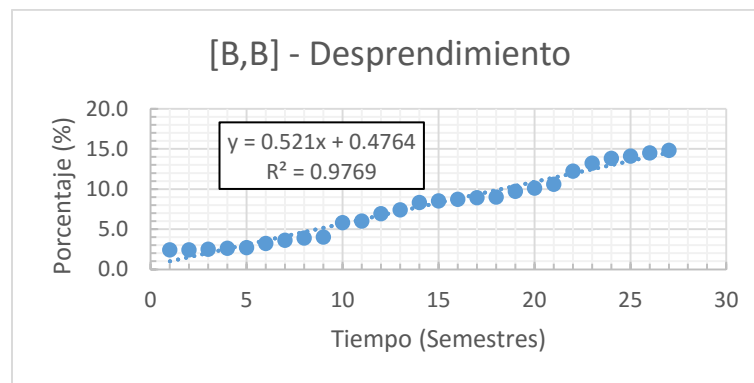
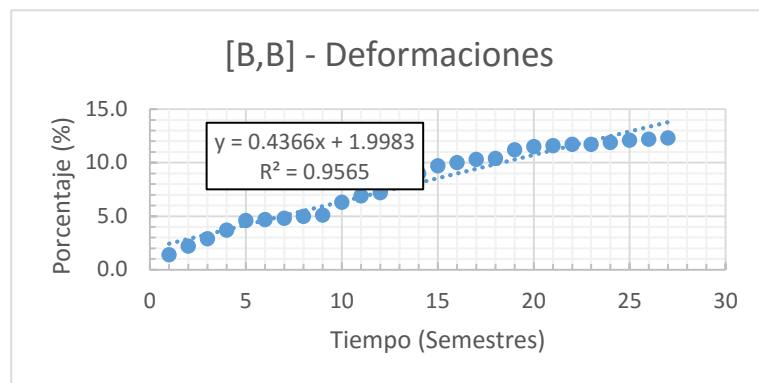
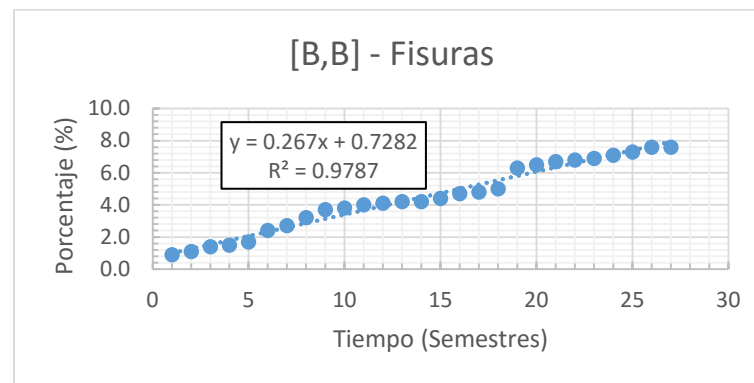
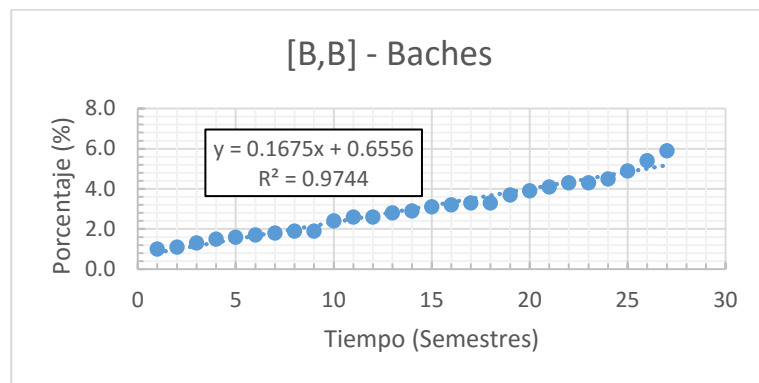


Figura 7.17: Modelos de regresión lineal simple libres para el escenario [B,B], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

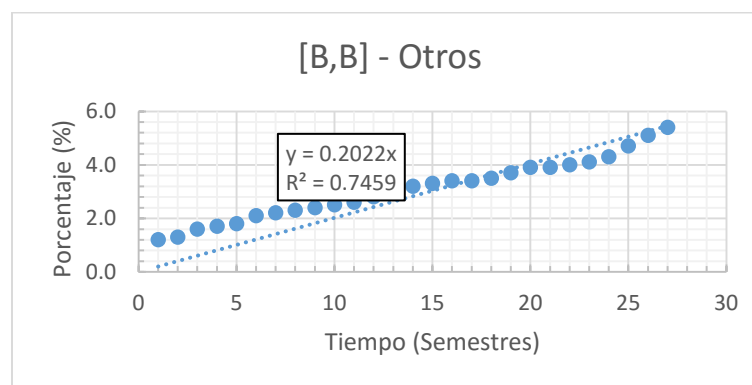
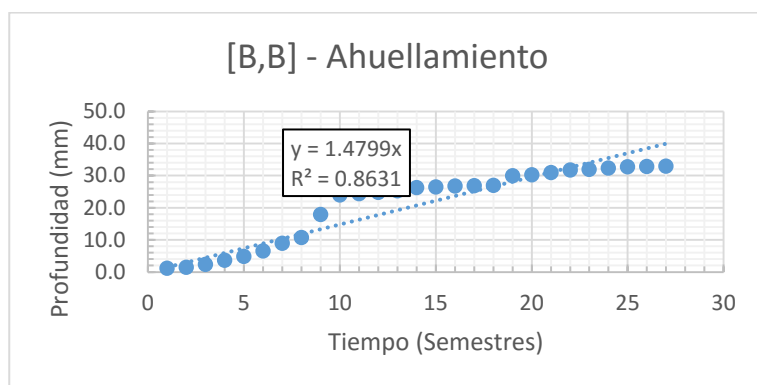
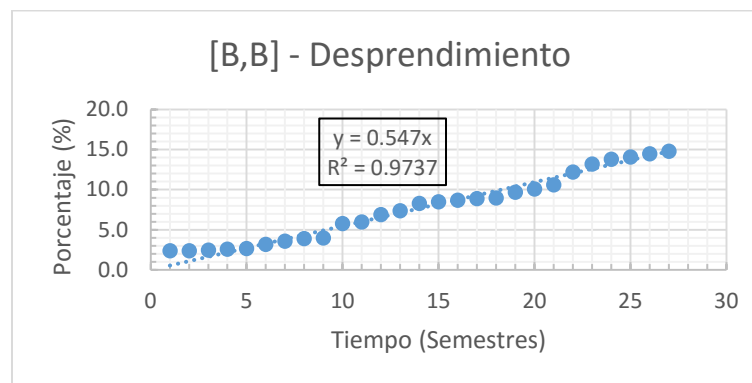
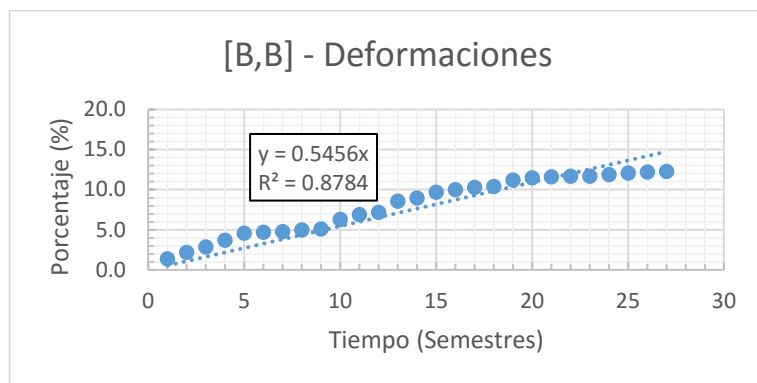
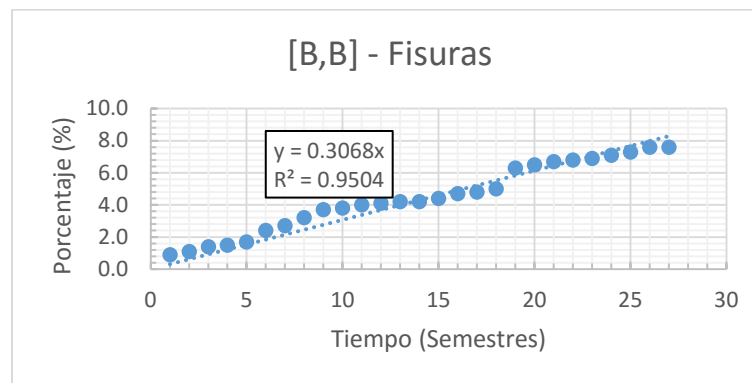
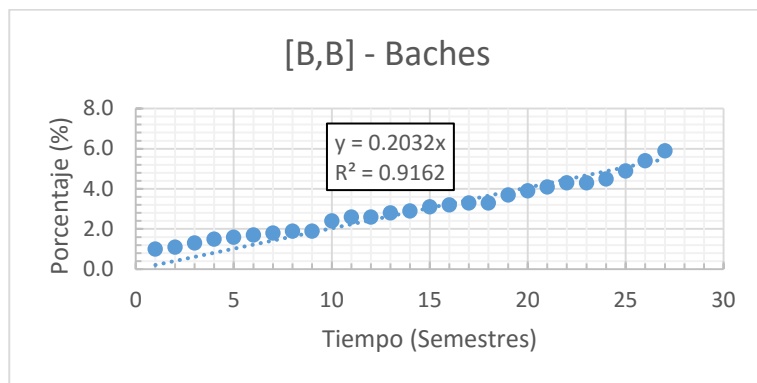


Figura 7.18: Modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero para el escenario [M,B], generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

La Tabla 7.1 presenta el resumen de los modelos de regresión lineal simple libres, determinados para cada uno de los nueve escenarios considerados en esta investigación. Se utilizan colores con el objetivo de facilitar la visualización de la tendencia decreciente de la tasa de cambio de cada uno de los tipos de deterioro a medida que disminuye la intensidad tanto de flujo vehicular como de temperatura. El color rojo indica las tasas de cambio más altas y se va degradando hasta el color verde el cual indica la tasa de cambio más pequeña.

Tabla 7.1: Resumen de los parámetros constitutivos de los *modelos de regresión lineal*, generados para los diferentes tipos de deterioro, en cada una de las nueve categorías de estudio.

	Baches								
	AA	MA	BA	AM	MM	BM	AB	MB	BB
<i>m</i>	0.5013	0.4974	0.4460	0.3573	0.2893	0.2779	0.2550	0.2498	0.1675
<i>b</i>	1.3442	-0.2521	0.3407	0.7417	1.0023	1.0131	1.0818	1.0071	0.6556
<i>R</i> ²	0.9620	0.9035	0.9739	0.9860	0.9708	0.9809	0.9291	0.9361	0.9744
	Fisuras								
	AA	MA	BA	AM	MM	BM	AB	MB	BB
<i>m</i>	0.6327	0.6225	0.6172	0.5049	0.4261	0.3730	0.3125	0.2894	0.2670
<i>b</i>	1.5761	0.6846	-0.1105	0.0057	0.9601	0.9157	1.0034	1.0746	0.7282
<i>R</i> ²	0.9812	0.9241	0.9661	0.9475	0.9487	0.9690	0.9748	0.9679	0.9787
	Deformaciones								
	AA	MA	BA	AM	MM	BM	AB	MB	BB
<i>m</i>	1.0947	1.0093	0.9189	0.8277	0.7989	0.7432	0.7063	0.6350	0.4366
<i>b</i>	0.1994	0.4211	1.3499	2.0527	2.7080	1.7439	1.9185	-0.1276	1.9983
<i>R</i> ²	0.9759	0.9655	0.9266	0.9640	0.8646	0.9008	0.9374	0.9750	0.9565
	Desprendimiento								
	AA	MA	BA	AM	MM	BM	AB	MB	BB
<i>m</i>	0.9111	0.8789	0.8125	0.7454	0.6883	0.6655	0.5930	0.5717	0.5210
<i>b</i>	1.2889	1.1949	1.8775	0.5569	0.6826	0.4866	0.9835	-0.0265	0.4764
<i>R</i> ²	0.9569	0.9732	0.9717	0.8792	0.9605	0.9773	0.9682	0.9807	0.9769
	Ahuellamiento								
	AA	MA	BA	AM	MM	BM	AB	MB	BB
<i>m</i>	2.9576	2.3425	1.9750	1.6433	1.6122	1.5799	1.5582	1.4471	1.3509
<i>b</i>	-5.1661	3.5422	7.0801	9.7014	7.2217	3.0516	1.3892	3.0484	2.3650
<i>R</i> ²	0.9742	0.9711	0.9600	0.9045	0.9231	0.9410	0.9424	0.9512	0.8735
	Otros								
	AA	MA	BA	AM	MM	BM	AB	MB	BB
<i>m</i>	0.3143	0.3097	0.2930	0.2700	0.2591	0.2580	0.2063	0.1885	0.1416
<i>b</i>	1.1732	0.6160	0.4575	0.8205	0.7726	0.7917	0.1823	0.4541	1.1097
<i>R</i> ²	0.9680	0.9822	0.9753	0.9266	0.9583	0.9822	0.8925	0.8606	0.9803

Igualmente se presenta a continuación en la Tabla 7.2 el resumen de los modelos de regresión lineal simple forzando el intercepto a cero “0”, determinados para cada uno de los nueve escenarios considerados en esta investigación:

Tabla 7.2: Resumen de los parámetros constitutivos de los *modelos de regresión lineal con intercepto fijo en cero*, generados para los diferentes tipos de deterioro, en cada una de las nueve categorías de estudio.

	Baches								
	AA	MA	BA	AM	MM	BM	AB	MB	BB
<i>m</i>	0.5747	0.4836	0.4646	0.3978	0.3439	0.3332	0.3140	0.3047	0.2032
<i>R</i> ²	0.9350	0.9026	0.9717	0.9695	0.9254	0.9301	0.8639	0.8768	0.9162
	Fisuras								
	AA	MA	BA	AM	MM	BM	AB	MB	BB
<i>m</i>	0.7186	0.6599	0.6111	0.5052	0.4785	0.4229	0.3672	0.3480	0.3068
<i>R</i> ²	0.9575	0.9197	0.9637	0.9475	0.9300	0.9463	0.9356	0.9151	0.9504
	Deformaciones								
	AA	MA	BA	AM	MM	BM	AB	MB	BB
<i>m</i>	1.1056	1.0323	0.9926	0.9466	0.9397	0.8383	0.8110	0.6281	0.5456
<i>R</i> ²	0.9758	0.9649	0.9188	0.9409	0.8259	0.8814	0.9105	0.9749	0.8784
	Desprendimiento								
	AA	MA	BA	AM	MM	BM	AB	MB	BB
<i>m</i>	0.9814	0.9441	0.9149	0.7893	0.7255	0.6920	0.6466	0.5703	0.5470
<i>R</i> ²	0.9495	0.9662	0.9515	0.9420	0.9568	0.9752	0.9579	0.9807	0.9737
	Ahuellamiento								
	AA	MA	BA	AM	MM	BM	AB	MB	BB
<i>m</i>	2.6758	2.5357	2.3612	2.1725	2.0061	1.7464	1.6340	1.6133	1.4799
<i>R</i> ²	0.9627	0.9625	0.9119	0.7817	0.8509	0.9273	0.9394	0.9348	0.8631
	Otros								
	AA	MA	BA	AM	MM	BM	AB	MB	BB
<i>m</i>	0.3783	0.3433	0.3179	0.3147	0.3012	0.2812	0.2162	0.2132	0.2022
<i>R</i> ²	0.9154	0.9670	0.9660	0.8932	0.9251	0.9461	0.8898	0.8412	0.7459

La razón por la cual se estimaron modelos forzando el valor del intercepto (parámetro b) igual a cero, es el de darle al ajuste lineal un significado consistente con el fenómeno físico modelado, ya que como es de suponer en el tiempo cero, cuando aún no se ha habilitado la vía para su uso, la estructura de pavimento no presenta ningún tipo de deterioro. A pesar de este forzamiento se puede apreciar en las Tablas 7.1 y 7.2 que las variaciones en el parámetro m, que indica la tasa de aumento de cada deterioro, no varía significativamente entre los modelos libres y los forzados.

7.3. VALIDACIÓN DE MODELOS

Una vez generados los modelos de regresión lineal con intercepto fijo en cero característico para cada uno de los nueve escenarios estipulados para los niveles de temperatura y flujo vehicular, se procedió a verificar estos modelos con tramos de vías válidos, esto es, tramos que en el tiempo de estudio nunca presentaron mejoría, y que no se incluyeron en los tramos empleados para la generación de las matrices. Como se apreciará en las gráficas que se mostrarán a continuación, los modelos presentan buena capacidad predictiva al capturar la tendencia de la tasa de deterioro para cada tipo de daño.

Para la comparativa se identificó la progresión de cada tipo de daño durante los nueve semestres siguientes según la medición realizada mediante el Criterio Técnico. Se ubicó el tramo dentro de la categoría correspondiente para asociarle los modelos de daño pertinentes y se procedió a graficar simultáneamente los datos medidos con la recta del modelo asociado a los nueve meses de medición para la vía de análisis. Adicional se muestran en el mismo gráfico los límites de predicción para cada modelo y se observa que en la mayoría de los casos los valores medidos se encuentran en esta zona. A continuación se presentan, en las Figuras 7.19 – 7.27, las vías seleccionadas con su comportamiento medido comparado con el comportamiento predicho.

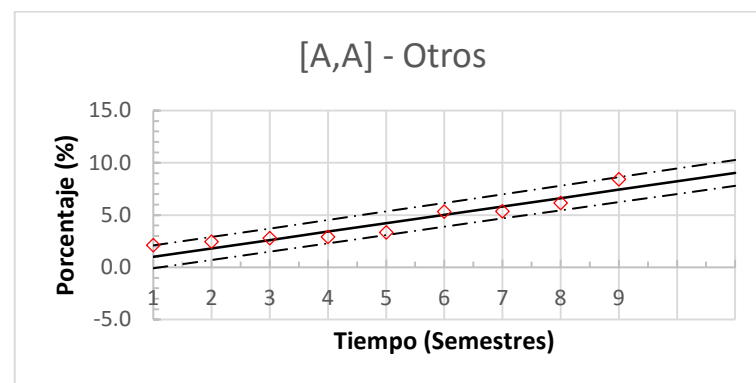
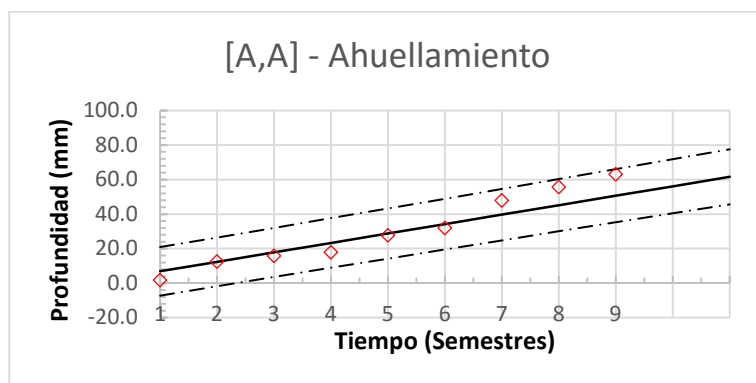
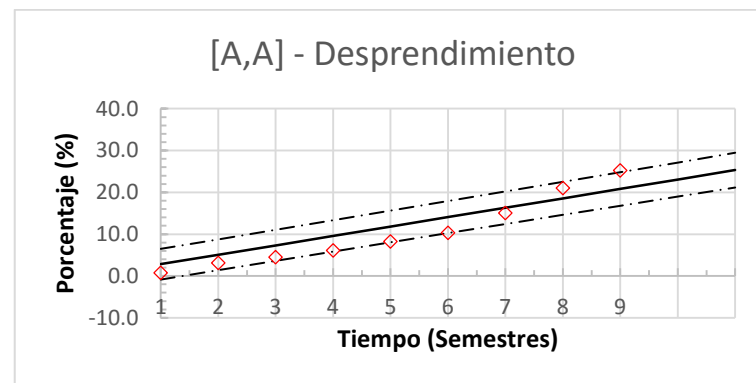
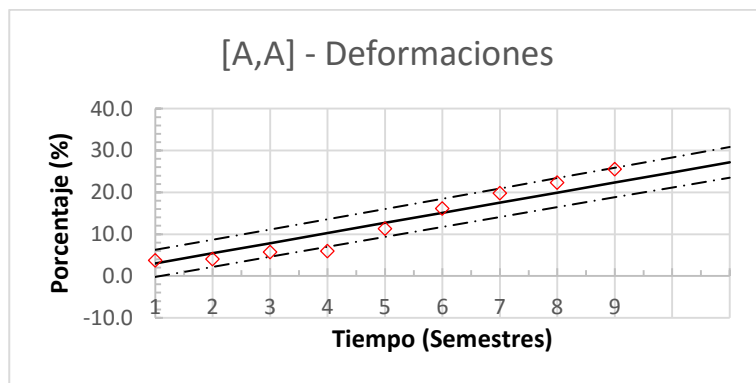
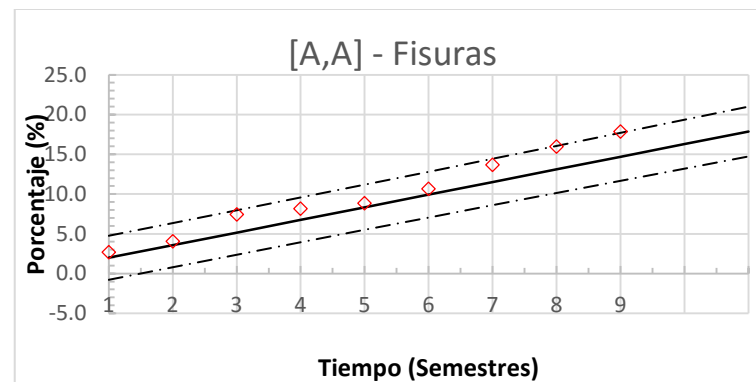
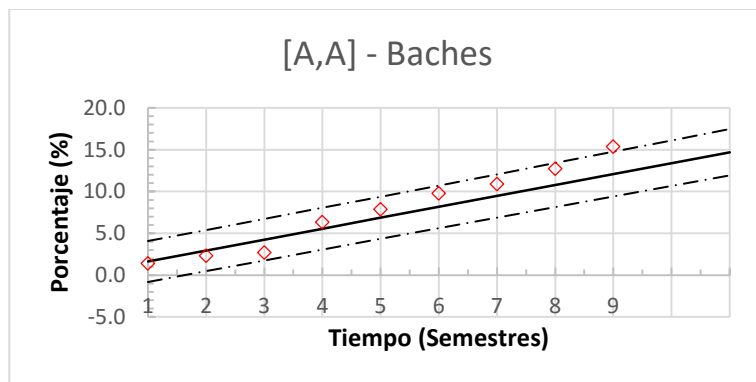


Figura 7.19: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [A,A] correspondiente a la vía **CERETE-ESTACION SAN MARTIN (Córdoba)**, generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

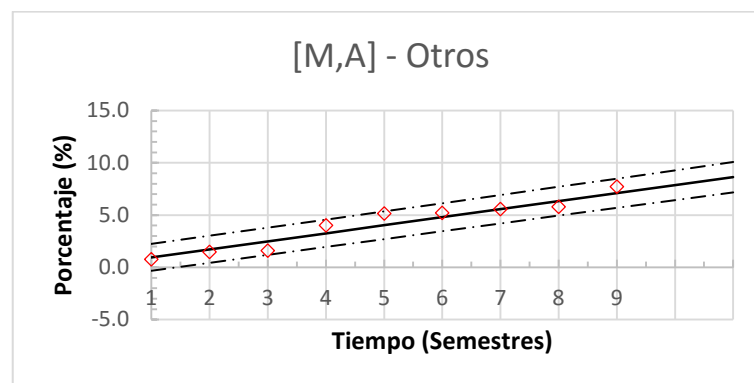
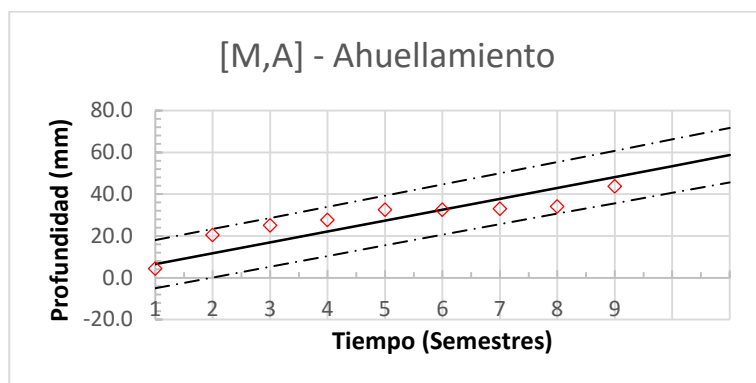
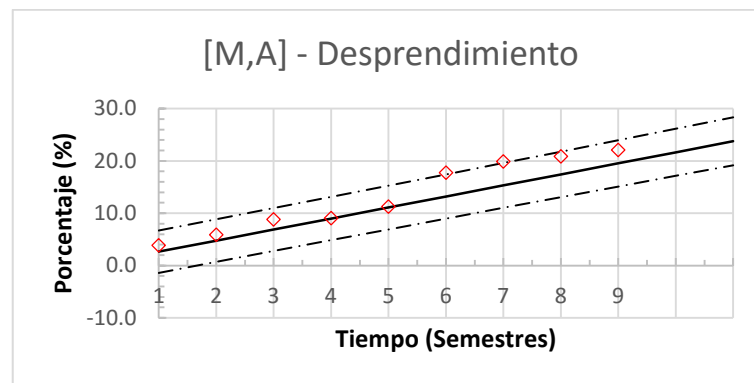
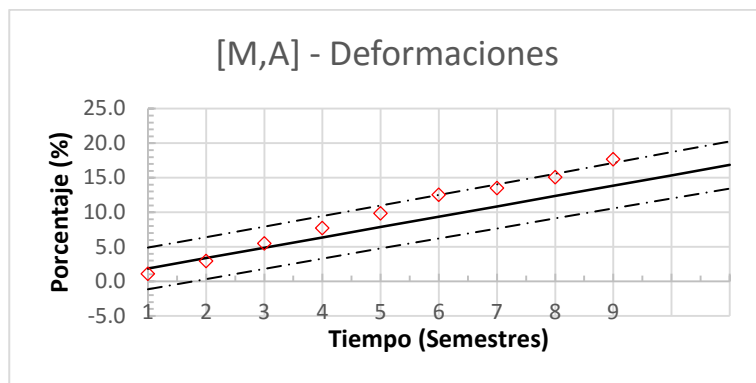
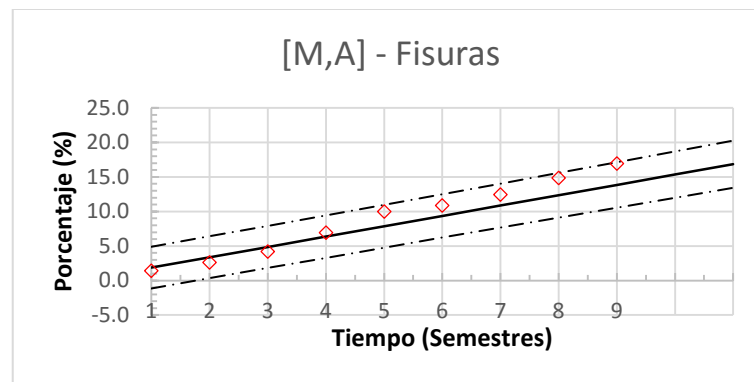
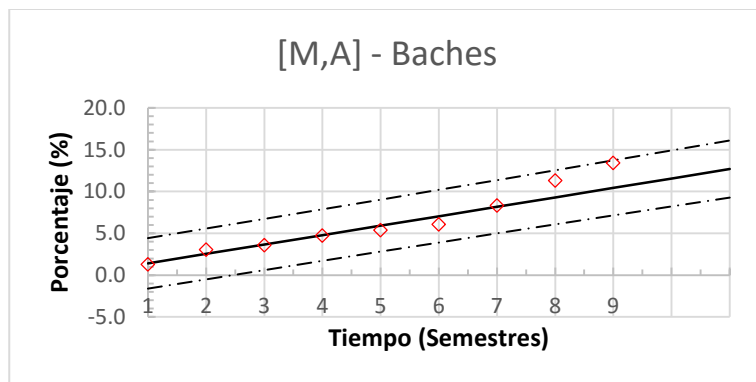


Figura 7.20: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [M,A], correspondiente a la vía **VENADILLO - LERIDA (Tolima)** generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

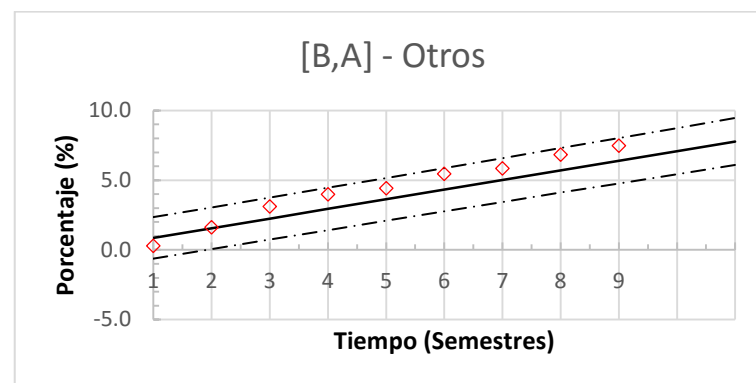
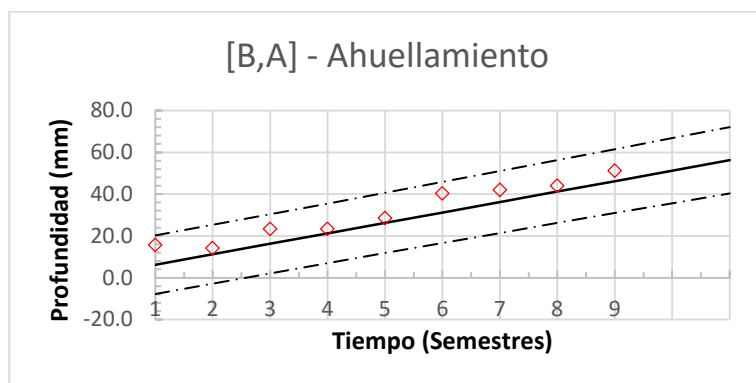
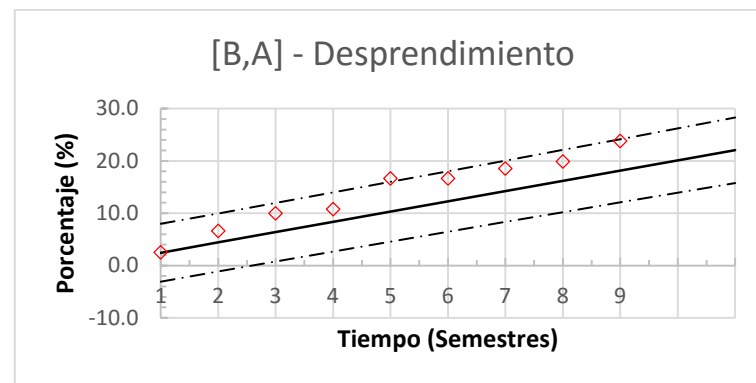
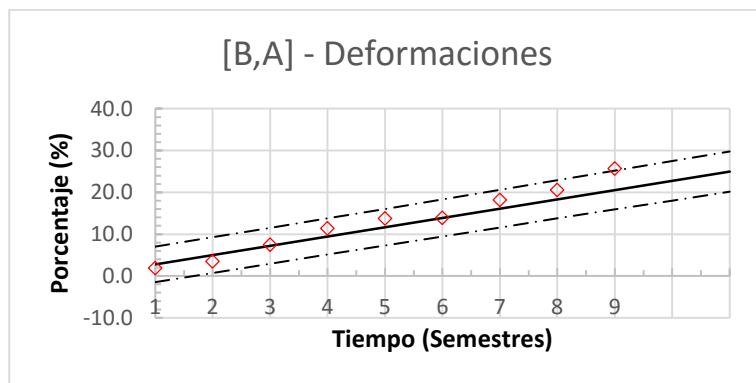
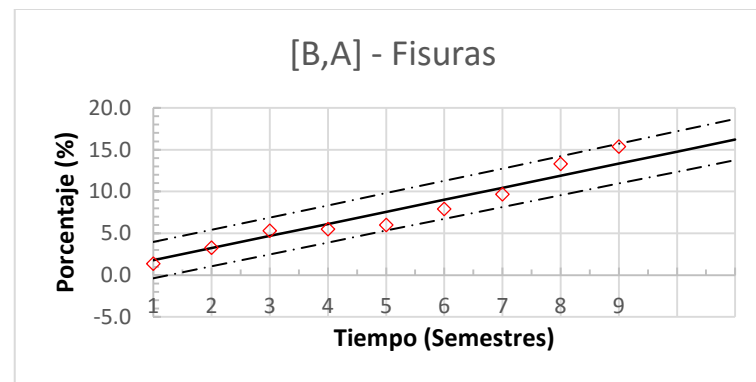
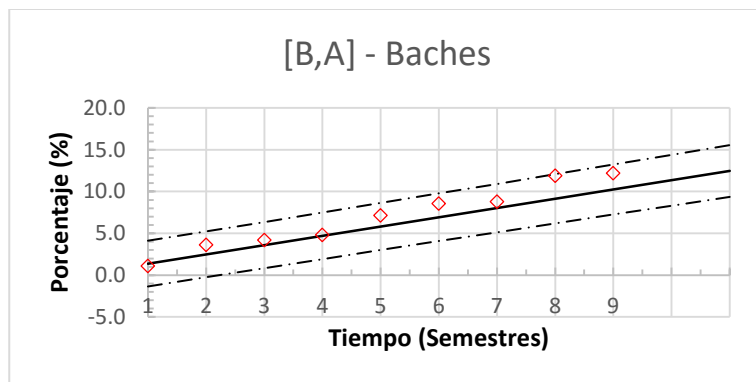


Figura 7.21: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [B,A], correspondiente a la vía **TUNJA-MORTIÑAL (Boyacá)** generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

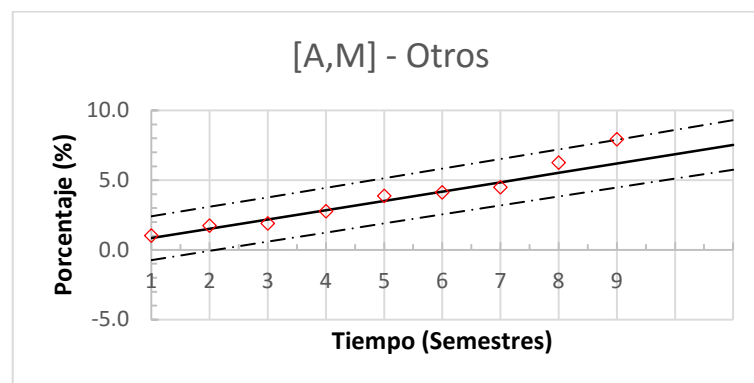
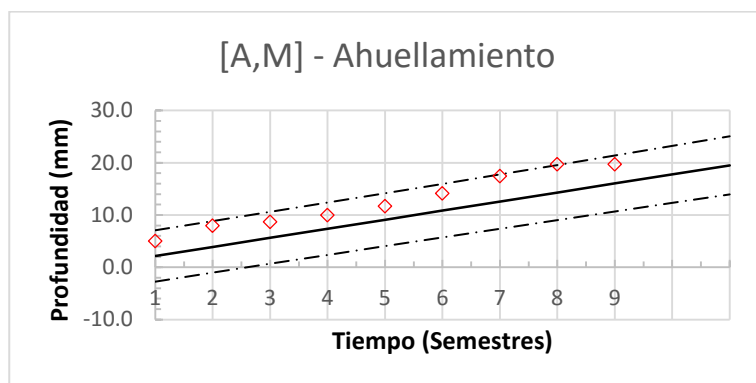
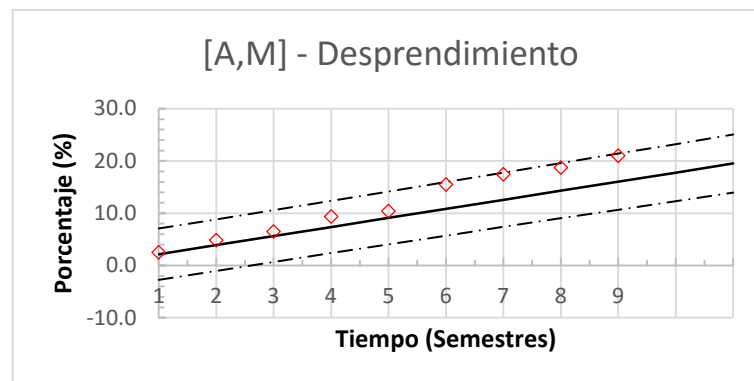
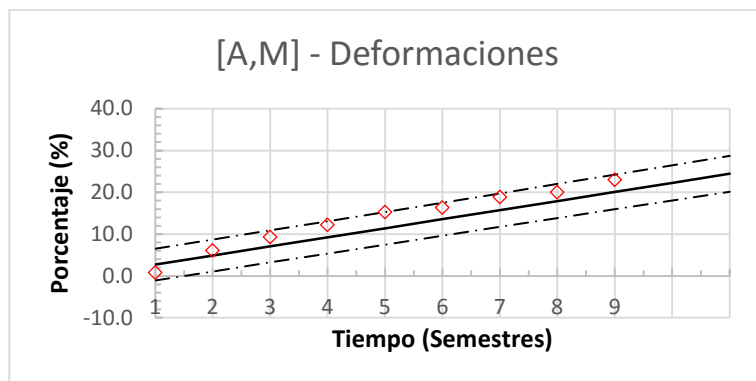
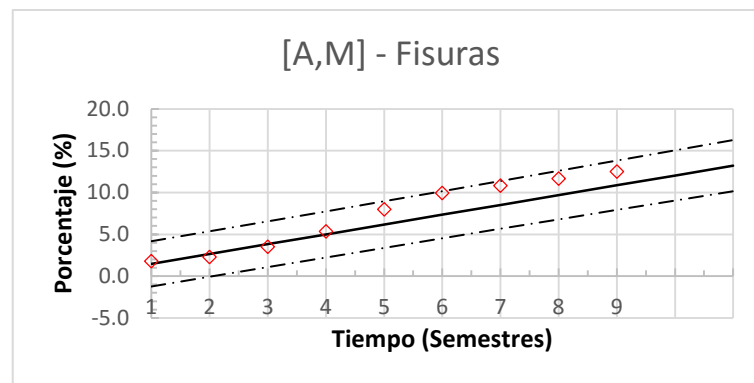
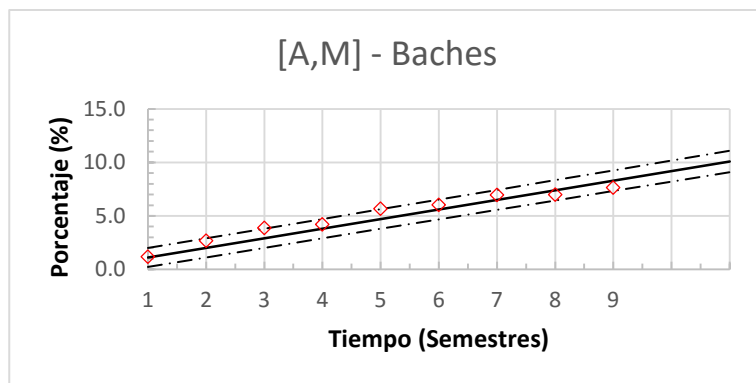


Figura 7.22: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [A,M], correspondiente a la vía **LA DONJUANA-DURANIA (Norte de Santander)** generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

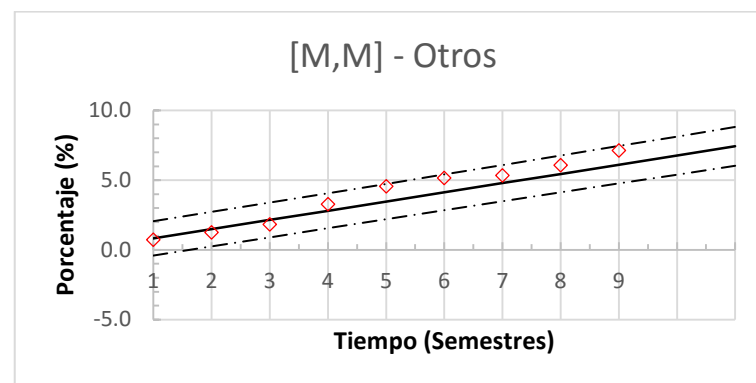
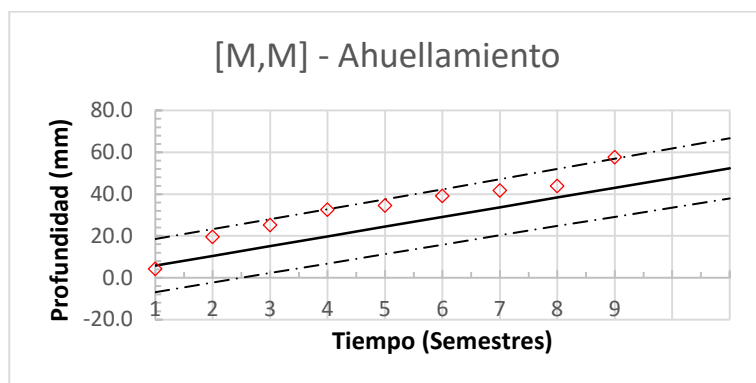
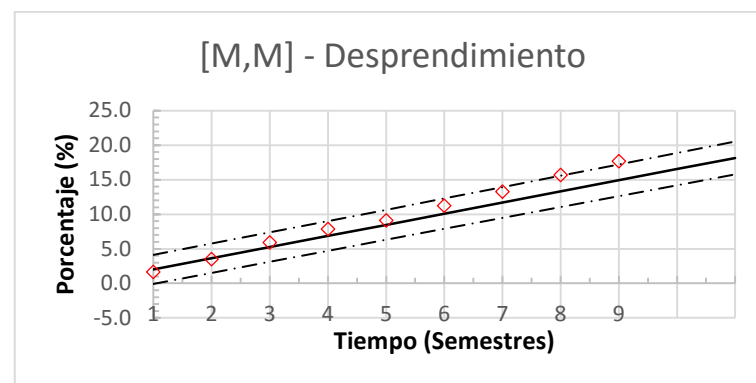
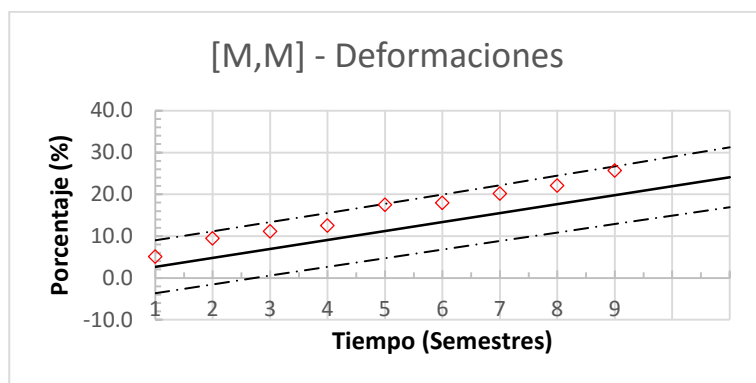
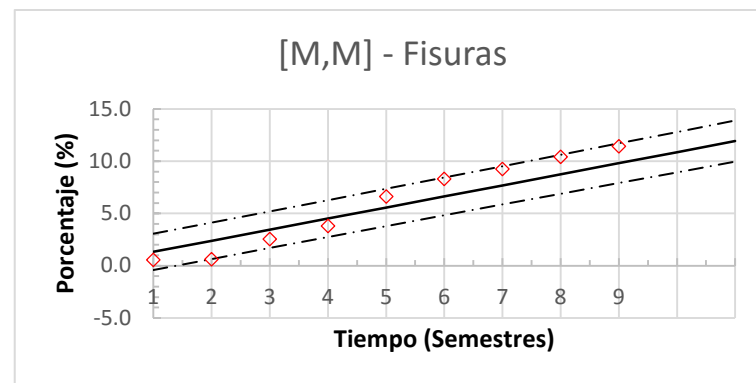
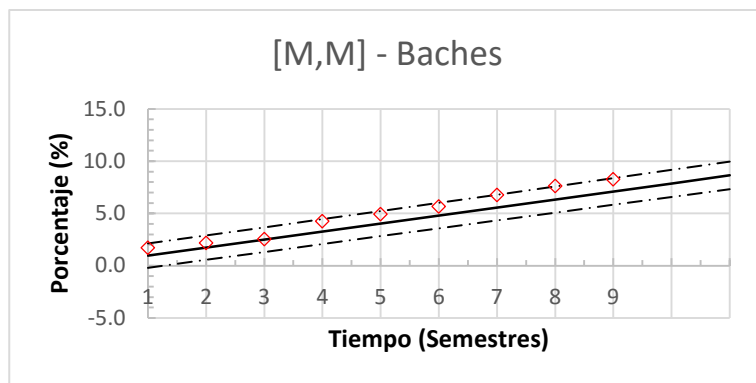


Figura 7.23: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [M,M], correspondiente a la vía **BOLIVAR-RIO FRIO (Valle del Cauca)** generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

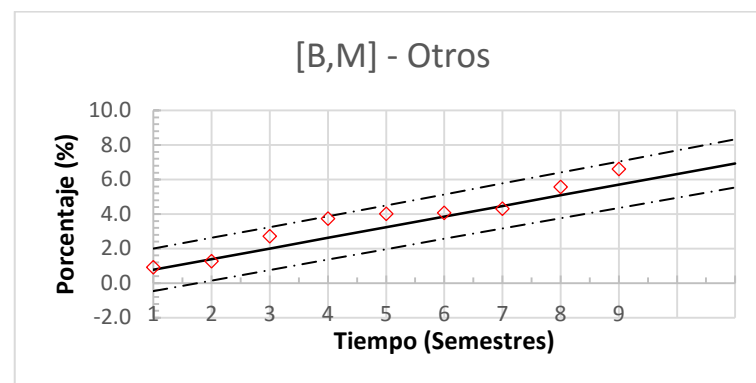
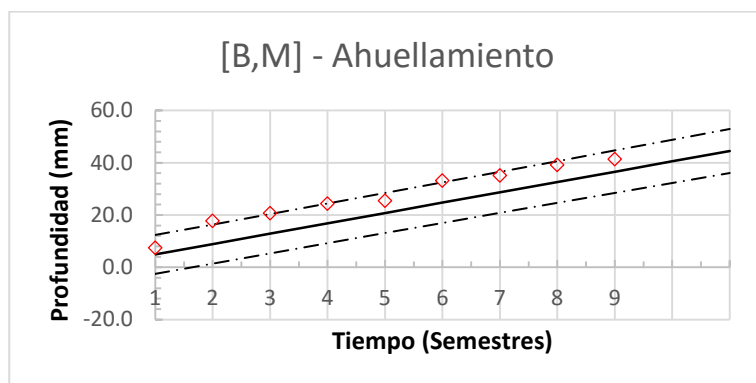
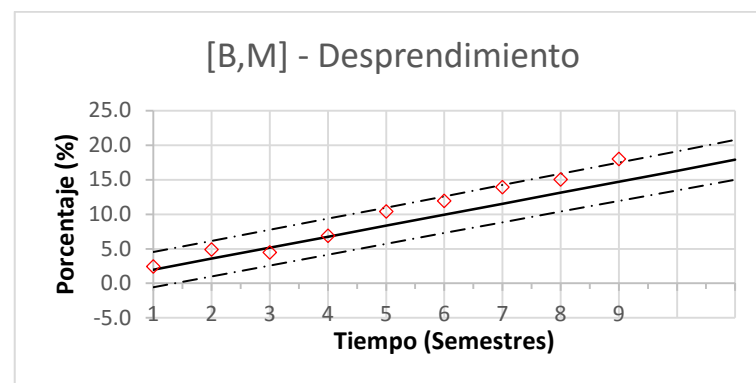
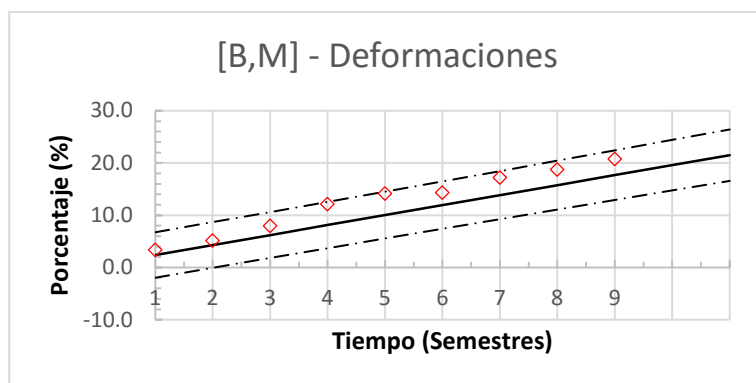
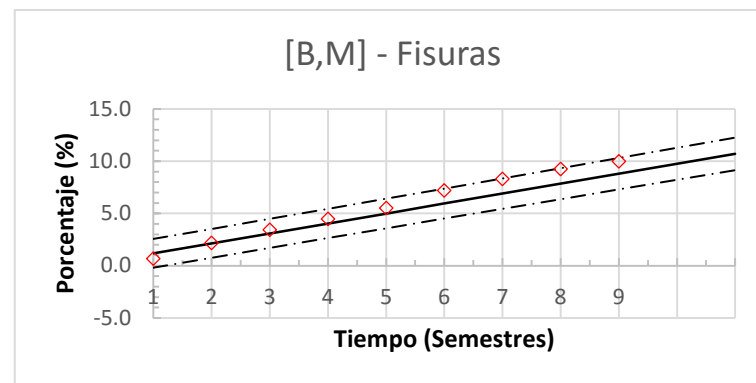
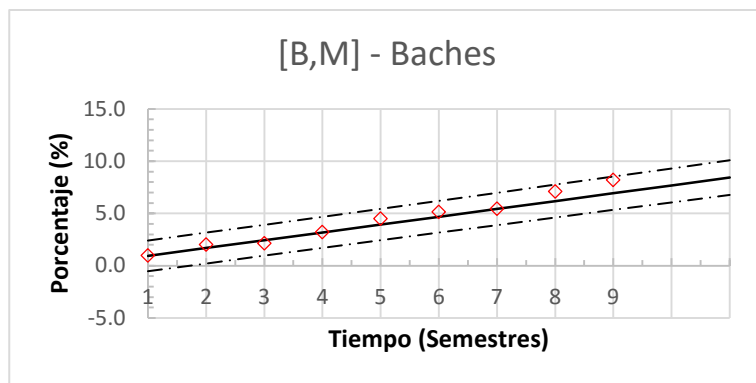


Figura 7.24: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [B,M], correspondiente a la vía **PUENTE LA LIBERTAD - LA ESPERANZA (Caldas)** generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

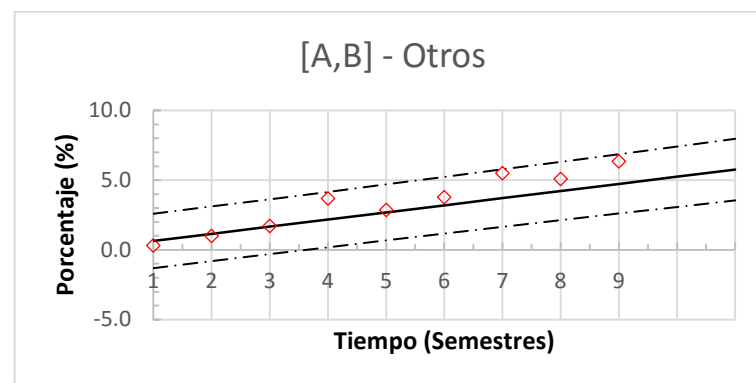
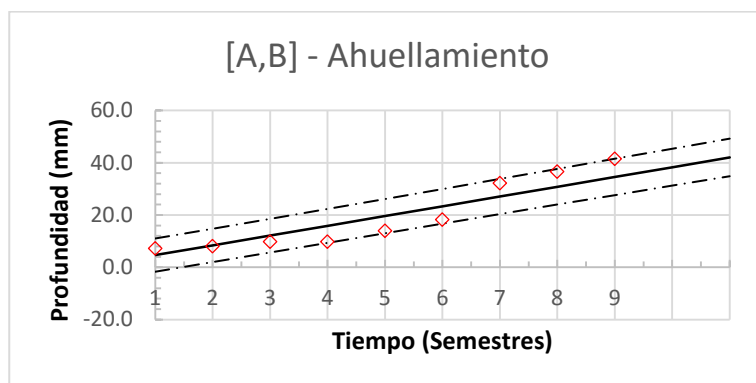
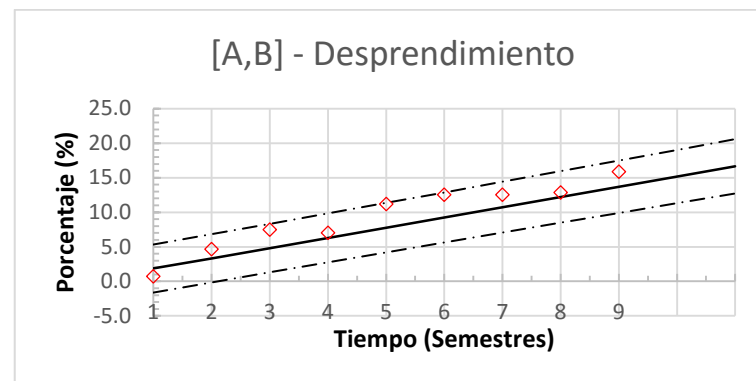
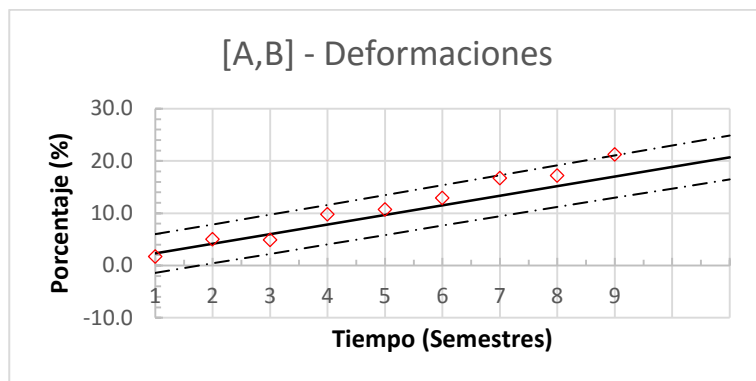
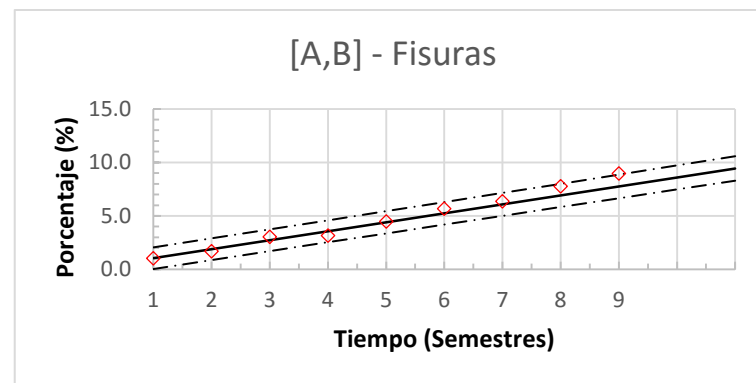
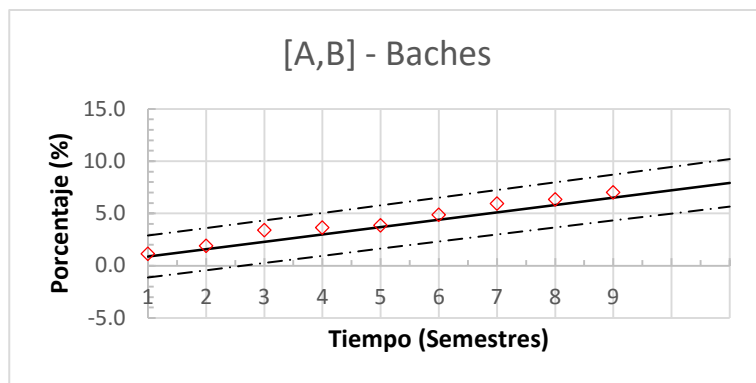


Figura 7.25: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [A,B], correspondiente a la vía **ALGARROBO-SI DIOS QUIERE (Magdalena)** generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

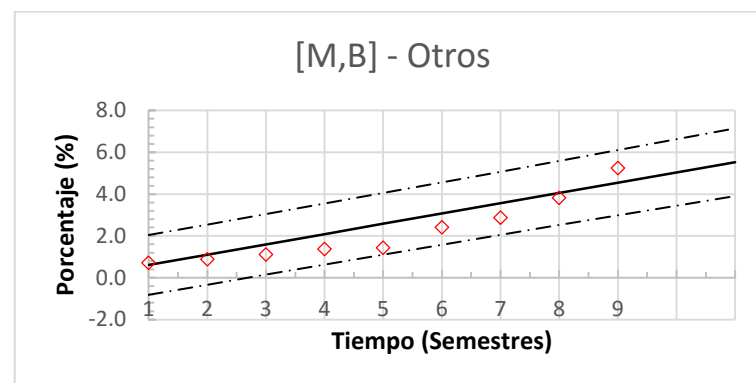
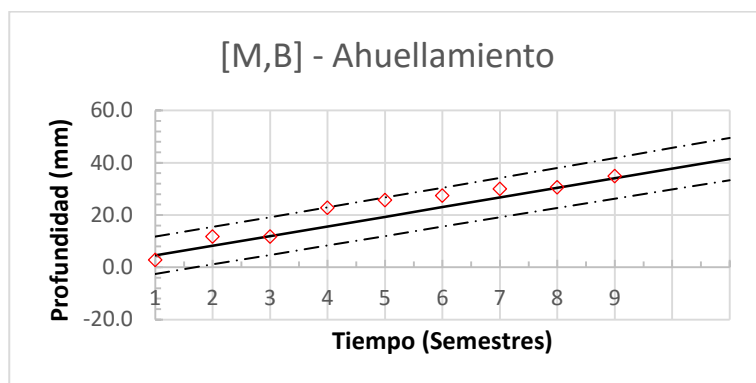
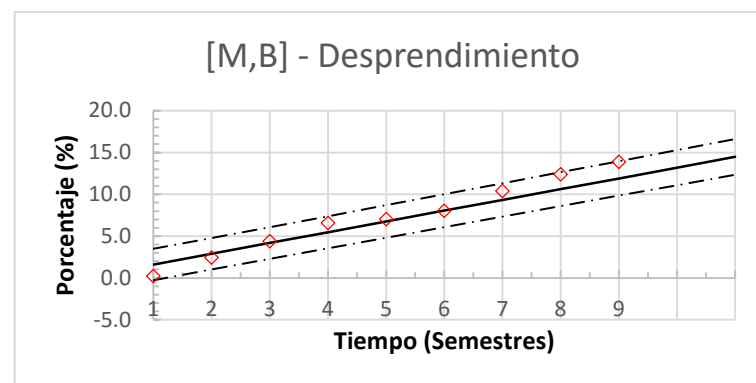
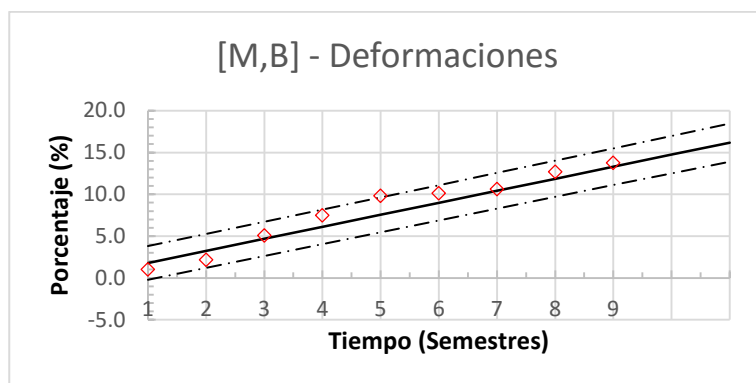
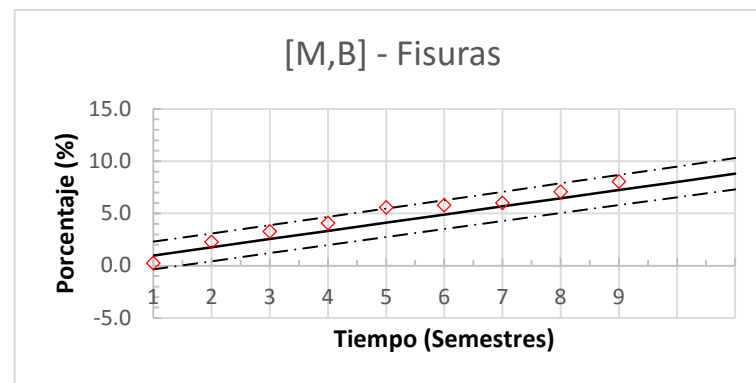
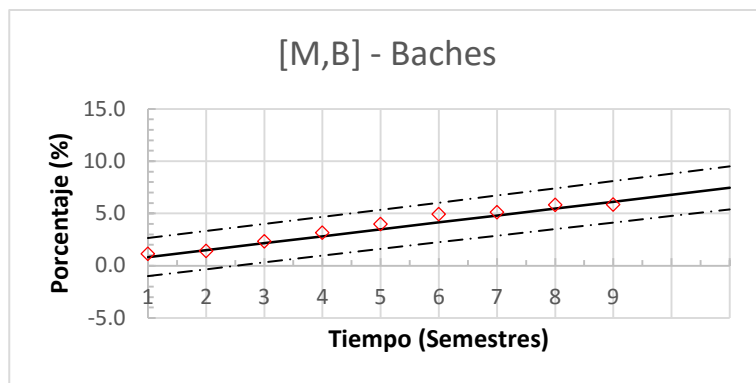


Figura 7.26: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [M,B], correspondiente a la vía **JARDIN-REMOLINO (Antioquia)** generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

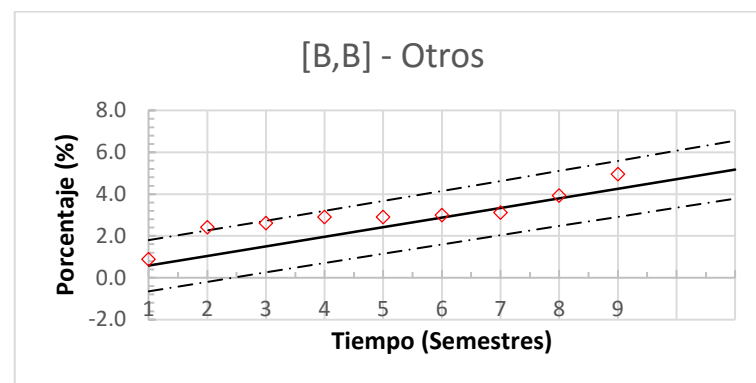
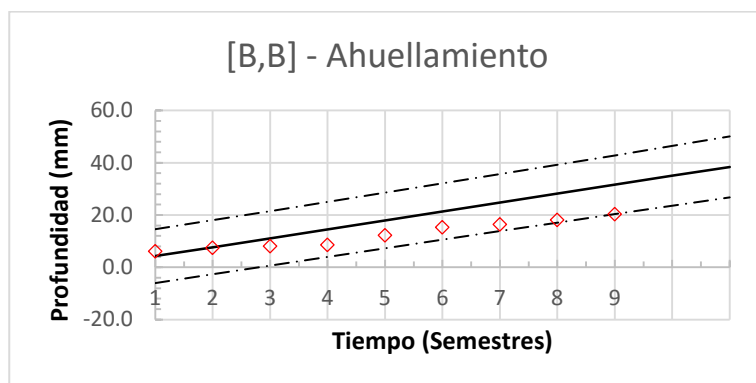
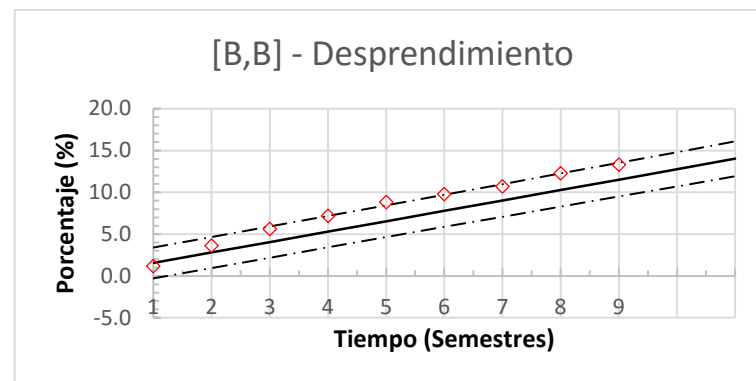
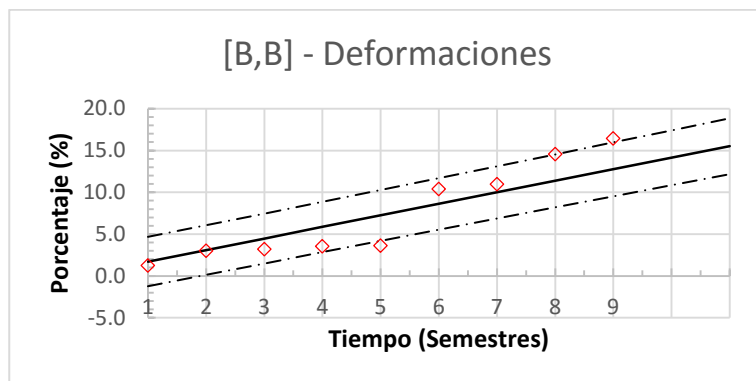
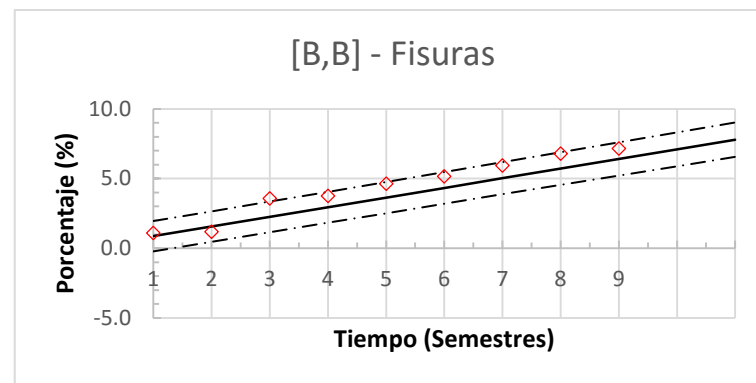
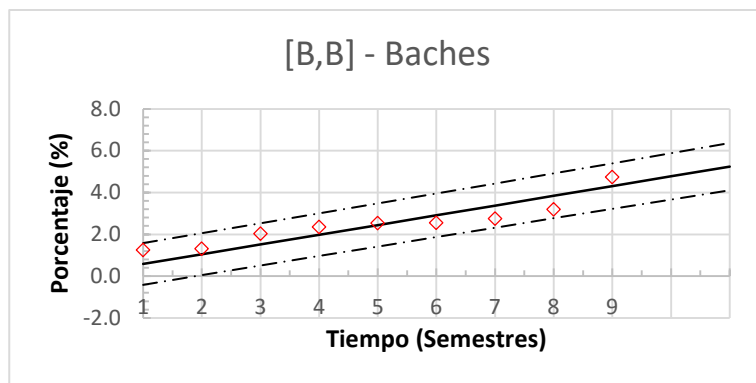


Figura 7.27: Modelos propuestos con los datos observados para el escenario [B,B], correspondiente a la vía **BELEN-PAZ DE RIO (Boyacá)** generados para cada uno de los siguientes tipos de daños: Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento, Otros.

7.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizaron dos tipos de análisis como se mencionó anteriormente. El primero fue generando modelos de regresión lineal simple libres, esto es, de la forma $y = m \cdot x + b$ donde m es la pendiente y b el intercepto con el eje de las ordenadas. El segundo análisis realizado corresponde a la generación de modelos en los cuales fue forzado el valor del intercepto, el parámetro b , igual a cero, esto es, modelos de la forma $y = m \cdot x$.

Se observa que en ambos tipos de modelos (los modelos de regresión lineal libre y los modelos de regresión lineal simple con intercepto forzado a cero) presentan un valor alto de coeficiente de determinación (R^2), lo que indica que la variable respuesta se encuentra explicada en gran medida por las variables independientes de entrada consideradas, en este caso el tiempo (en semestre). Los buenos valores de R^2 pueden deberse a que el número de semestres considerados en el análisis es pequeño y una posible tendencia de los datos, diferente a la lineal, no se alcanza a desarrollar en ese tiempo, o bien porque realmente la asunción de linealidad es correcta. Se aprecia también que el valor de “ b ”, el intercepto, es muy pequeño y cercano a cero. Se esperaría que este fuera exactamente igual a cero, ya que la formulación de los modelos pretende que el comportamiento de aumento en cada uno de los deterioros sea capturado en su totalidad por la variable tiempo, además de que se asumen que en el tiempo “cero”, la red no presenta ningún tipo de deterioros. El hecho de que en los modelos libres se obtengan valores diferente de cero para el parámetro “ b ” se podría explicar por la no homogeneidad del estado de las vías utilizadas en la determinación de los parámetros, es decir, que al tener tramos de vías que se encontraban en diferentes estados de deterioro, se genera ruido en el modelo al pretender y asumir, como se asumió en esta investigación, que la tasa de deterioro del pavimento es independiente del estado porcentual presente para los tipos de daños contemplados. Por este motivo se presentan complementariamente los modelos en los cuales el parámetro “ b ” se fija a cero. De lo anterior se puede concluir, al observar los valores del parámetro “ b ” en los modelos libres, que es cierta la asunción constitutiva de los modelos de deterioro de que el aumento en el porcentaje de cada tipo de daño no depende de forma significativa del estado actual de la red.

Es interesante observar que el comportamiento de la tasa de deterioro tanto de los modelos libres como de los modelos con intercepto fijado a cero, mantienen la consistencia esperada con el grado de criticidad de cada uno de los nueve escenarios establecidos, siendo mayor la pendiente en los modelos para todos los tipos de deterioro en el escenario donde la temperatura y el flujo vehicular es mayor, que donde estos dos factores son menores.

Por otro lado, se comparó también las tasas de deterioro de cada tipo de daño en los diferentes escenarios y se observa un patrón de comportamiento similar de los coeficientes de estos modelos. La descripción de la gráfica de las tasas de deterioro para los modelos libre y los modelos de intercepto ajustado a cero son similares, lo cual está alineado con el hecho de que los valores del parámetro b son pequeños y al forzar su valor a cero, la afectación en el valor del parámetro m no es suficiente para alterar la tendencia de criticidad de este en función del escenario correspondiente.

Se observa que el tipo de daño “Otros” es el que menor tasa de deterioro (parámetro “ m ”) presenta y su variación en los nueve escenarios es casi nula. La tasa de deterioro de “Baches” es la segunda menor y presenta un decaimiento rápido hasta el escenario “AM”, luego se estabiliza y su comportamiento se asemeja al tipo de daño “Otros” a partir de la categoría “MM”. La tasa de deterioro del daño “Fisuras” se mantiene estable hasta el escenario “BA” luego decae con mayor rapidez y se asemeja a las tasas de deterioro de “Baches” desde “AB”. Los tipos de daños “Desprendimiento” y “Deformaciones” inician y terminan con tasas de deterioro similares, aunque en los demás escenarios, los coeficientes de “Deformaciones” son mayores a los de “Desprendimiento”. Finalmente, el más irregular de los deterioros es el de Ahuellamiento principalmente en los coeficientes de deterioro desde “AA” hasta “AM”. Los coeficientes de deterioro para este tipo de daño son sustancialmente mayores al resto de daño como se observa en la Figura 7.28, ya que éste es medido en mm, mientras el resto de deterioros se miden en términos de porcentaje.

Por último, se observa que los modelos presentan excelentes cualidades predictivas al ser comparados con mediciones reales realizadas por los Administradores Viales en la misma ventana de tiempo de análisis para cada uno de los nueve escenarios

considerados en esta investigación. Los datos de validación de los modelos no fueron incluidos en la base de datos empleados para la generación de los mismos.

A continuación, la Figura 7.28 se presentan la variación en las tasas de deterioro estimados en los modelos libres, para cada tipo de daño de pavimento en cada uno de los nueve escenarios contemplados.

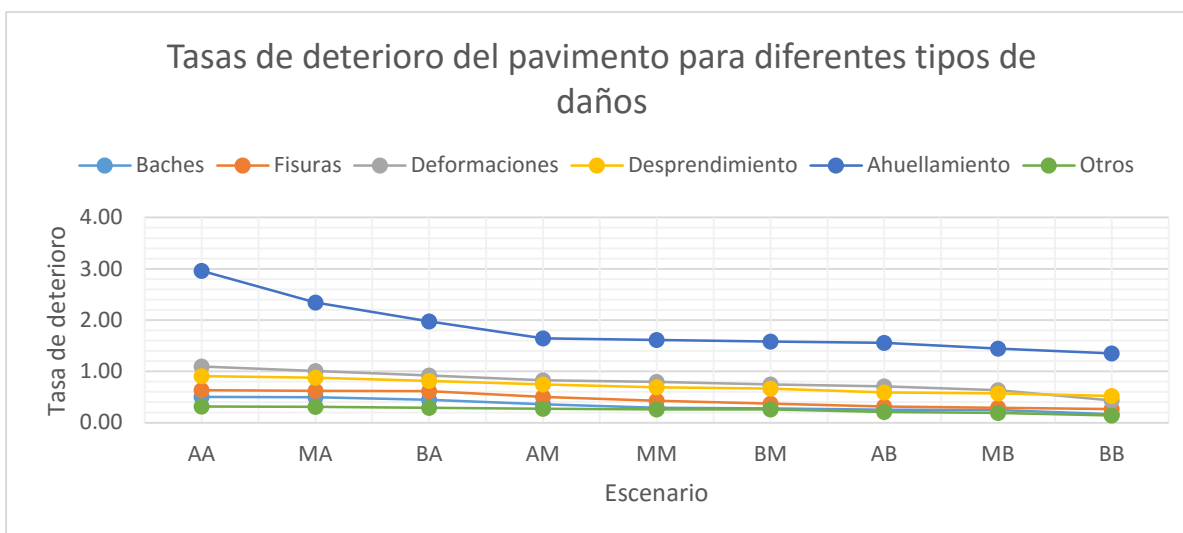


Figura 7.28: Variación de las tasas de deterioro de cada tipo de daño para los diferentes escenarios para los modelos de regresión lineal simple libres.

De manera análoga se presenta la Figura 7.29 para la variación en las tasas de deterioro estimados en los modelos con intercepto fijo en cero, para cada tipo de daño de pavimento en cada uno de los nueve escenarios contemplados.

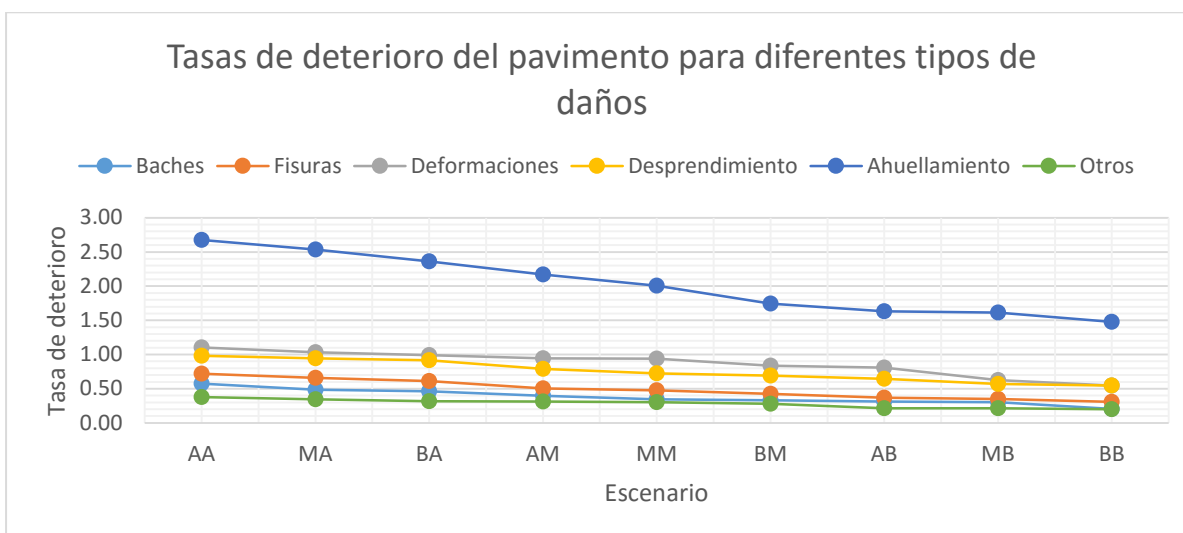


Figura 7.29: Variación de las tasas de deterioro de cada tipo de daño para los diferentes escenarios para los modelos de regresión lineal con intercepto forzado a cero.

Como se mencionó anteriormente, por cuestiones de unidades de medición la curva correspondiente a Ahuellamiento es la única que se separa sustancialmente de los otros tipos de daños, ya que el deterioro Ahuellamiento es medido en mm, mientras que los otros 5 tipos de deterioro son medidos porcentualmente según el área afectada por tramo.

Como previamente se adelantó, el comportamiento apreciado en las Figuras 7.28 y 7.29 es bastante similar, aunque se aprecian algunas variaciones. Estas variaciones pueden explicarse a causa de la interferencia que introduce el hecho de que los modelos consideran que el estado de deterioro de la vía no tiene incidencia en la velocidad en la que estos progresaran en el tiempo.

Para efectos de visualización y con el objetivo de mantener consistencia con el formato de presentación de la comparativa para cada uno de los escenarios generados según temperatura y flujo vehicular, se presentan las Tablas 7.3 y 7.4 donde se condensan los parámetros de los modelos lineales obtenidos, tanto en la modelación libre con la de intercepto cero.

Tabla 7.3: Resumen **Modelos lineales libres** para fenómenos de deterioro del pavimento arreglados por escenarios de Temperatura-TPD.

AA							MA							BA						
	Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros		Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros		Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros
m	0.5013	0.6327	1.0947	0.9111	2.9576	0.3143	m	0.4974	0.6225	1.0093	0.8789	2.3425	0.3097	m	0.4460	0.6172	0.9189	0.8125	1.9750	0.2930
b	1.3442	1.5761	0.1994	1.2889	-5.1661	1.1732	b	-0.2521	0.6846	0.4211	1.1949	3.5422	0.6160	b	0.3407	-0.1105	1.3499	1.8775	7.0801	0.4575
R2	0.9620	0.9812	0.9759	0.9569	0.9742	0.9680	R2	0.9035	0.9241	0.9655	0.9732	0.9711	0.9822	R2	0.9739	0.9661	0.9266	0.9717	0.9600	0.9753

AM							MM							BM						
	Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros		Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros		Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros
m	0.3573	0.5049	0.8277	0.7454	1.6433	0.2700	m	0.2893	0.4261	0.7989	0.6883	1.6122	0.2591	m	0.2779	0.3730	0.7432	0.6655	1.5799	0.2580
b	0.7417	0.0057	2.0527	0.5569	9.7014	0.8205	b	1.0023	0.9601	2.7080	0.6826	7.2217	0.7726	b	1.0131	0.9157	1.7439	0.4866	3.0516	0.7917
R2	0.9860	0.9475	0.9640	0.8792	0.9045	0.9266	R2	0.9708	0.9487	0.8646	0.9605	0.9231	0.9583	R2	0.9809	0.9690	0.9008	0.9773	0.9410	0.9822

AB							MB							BB						
	Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros		Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros		Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros
m	0.2550	0.3125	0.7063	0.5930	1.5582	0.2063	m	0.2498	0.2894	0.6350	0.5717	1.4471	0.1885	m	0.1675	0.2670	0.4366	0.5210	1.3509	0.1416
b	1.0818	1.0034	1.9185	0.9835	1.3892	0.1823	b	1.0071	1.0746	-0.1276	-0.0265	3.0484	0.4541	b	0.6556	0.7282	1.9983	0.4764	2.3650	1.1097
R2	0.9291	0.9748	0.9374	0.9682	0.9424	0.8925	R2	0.9361	0.9679	0.9750	0.9807	0.9512	0.8606	R2	0.9744	0.9787	0.9565	0.9769	0.8735	0.9803

Tabla 7.4: Resumen **Modelos lineales con intercepto fijo en cero** para fenómenos de deterioro del pavimento arreglados por escenarios de Temperatura-TPD.

AA							MA							BA						
	Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros		Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros		Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros
m	0.5747	0.7186	1.1056	0.9814	2.6758	0.3783	m	0.4836	0.6599	1.0323	0.9441	2.5357	0.3433	m	0.4646	0.6111	0.9926	0.9149	2.3612	0.3179
R2	0.9350	0.9575	0.9758	0.9495	0.9627	0.9154	R2	0.9026	0.9197	0.9649	0.9662	0.9625	0.9670	R2	0.9717	0.9637	0.9188	0.9515	0.9119	0.9660

AM							MM							BM						
	Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros		Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros		Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros
m	0.3978	0.5052	0.9466	0.7893	2.1725	0.3147	m	0.3439	0.4785	0.9397	0.7255	2.0061	0.3012	m	0.3332	0.4229	0.8383	0.6920	1.7464	0.2812
R2	0.9695	0.9475	0.9409	0.9420	0.7817	0.8932	R2	0.9254	0.9300	0.8259	0.9568	0.8509	0.9251	R2	0.9301	0.9463	0.8814	0.9752	0.9273	0.9461

AB							MB							BB						
	Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros		Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros		Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimiento	Ahuellamiento	Otros
m	0.3140	0.3672	0.8110	0.6466	1.6340	0.2162	m	0.3047	0.3480	0.6281	0.5703	1.6133	0.2132	m	0.2032	0.3068	0.5456	0.5470	1.4799	0.2022
R2	0.8639	0.9356	0.9105	0.9579	0.9394	0.8898	R2	0.8768	0.9151	0.9749	0.9807	0.9348	0.8412	R2	0.9162	0.9504	0.8784	0.9737	0.8631	0.7459

8. CONCLUSIONES

Se desarrolló un análisis detallado de la influencia de la temperatura y el flujo vehicular en la pérdida de calidad (calificación) de los pavimentos flexibles en Colombia con base en la información medida, a través de la metodología de evaluación de Criterio Técnico, realizada semestralmente por los Administradores Viales del INVIAS. Se emplearon modelos probabilísticos de Matrices de Transición de Probabilidad de Markov, para generar matrices características para determinadas condiciones de temperatura y flujo vehicular, cubriendo de esta forma todo el espectro de climas y uso de las vías que se presentan en el territorio nacional. Las MTP desarrolladas aplican para análisis y predicciones a nivel de red, debido a que para su desarrollo se emplearon un gran número de vías diferentes con características similares de temperatura y tránsito. Se observó que la pérdida de calidad del pavimento ocurre más rápido en los escenarios donde la temperatura y el flujo vehicular son mayor que en los escenarios donde estos dos factores son menores. Los modelos obtenidos evidencian que el factor más determinante en el deterioro del pavimento es el flujo vehicular, primando sobre las condiciones de temperatura de la misma. También, debido a la inexistencia en la literatura de una metodología para valorar cuantitativamente la velocidad de deterioro asociada a una MTP, se sugirió un método para medir el grado de criticidad de una matriz, realizando un análisis dinámico de tercer orden del proceso de deterioro del pavimento. Los resultados del índice de criticidad (IC) calculados fueron consistentes con la velocidad y la tendencia esperada del deterioro del pavimento.

Adicional al desarrollo de las MTP descrito anteriormente, se complementó el análisis a nivel macro del deterioro de las vías, con un estudio de los tipos de daños que se presentan en la estructura de pavimento y que contribuyen a la pérdida de calidad del mismo. Esto se llevó a cabo mediante la generación de modelos de Regresión

Lineal Simple, tanto libres como en los que se forzó el valor del parámetro de intercepto a cero, utilizando la metodología de “ventanas”, para las mediciones de Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento y Otros, consignados también en la evaluación de Criterio Técnico. Estos modelos se generaron para cada uno de los diferentes escenarios establecidos para diferentes niveles de temperatura y flujo vehicular, manteniendo los escenarios establecidos para la generación de las matrices de transición de probabilidad. Se observó, tanto en los modelos libres como en los forzados, que para mayores niveles de temperatura y de flujo vehicular los coeficientes que miden la velocidad de evolución de un deterioro, son mayores que en los escenarios donde estos factores son menores.

Tanto para los Modelos Matriciales como para los Modelos de Regresión Lineal se realizaron validaciones y se observaron buenas cualidades predictivas de éstos, al ser comparados los resultados predichos por los modelos con mediciones realizadas sobre la red vial colombiana. Estos modelos le permitirán al INVIAS enriquecer su sistema de gestión de los pavimentos del país, dándole la posibilidad de garantizar por un determinado periodo de tiempo las condiciones de seguridad, comodidad y capacidad estructural adecuadas para la circulación del tránsito, minimizando los costos de rehabilitación, permitiéndole también priorizar proyectos de intervención y hacer un uso eficiente de los recursos disponibles, al conocer las condiciones de determinado pavimento en cualquier instante de tiempo, teniendo claro el régimen de tránsito que circula sobre él y las condiciones ambientales en las que se encuentra.

9. FUTURAS INVESTIGACIONES

- Sugerir al INVIAS la implementación de una metodología de revisión vial más frecuentes (realizar más de dos informes técnicos al año), que permitan tener más datos y de esta forma capturar de forma más gradual el proceso de deterioro de los pavimentos en Colombia. Adicional a esto la creación de unos protocolos de documentación y manejo de bases de datos más rigurosos y ordenados pensados para el procesamiento de esta información con fines de gestión.
- Elaborar conjuntamente con el INVIAS un sistema de monitoreo continuo y permanente del estado de las vías en Colombia, que permitiese la actualización en tiempo real de las matrices de Markov, con el fin de capturar el efecto dinámico del deterioro de los pavimentos.
- Debido a la gran diversidad de condiciones climáticas y el amplio espectro de los niveles de Flujo Vehicular, sería interesante generar más de tres niveles para los dos parámetros tenidos en cuenta en esta investigación. Esto ayudaría a predecir con mayor precisión, tanto la proporción de estado de las vías, como el grado de avance de cada uno de los diferentes deterioros. En regiones del país que no necesariamente encajan en la categorización realizada.
- Sería interesante realizar mediciones que permitieran determinar valores de Tiempo Muerto (t_0) recomendables para minimizar la pérdida de calificación de la vía antes de su inauguración.
- En esta investigación se desarrollaron modelos lineales para intentar capturar la tasa de incremento de cada uno de los seis tipos de deterioro (Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimiento y Ahuellamineto) tenidos en cuenta por el INVIAS. Sería interesante probar diferentes tipos de ajustes que

permitieran capturar mejor el comportamiento de estos fenómenos de deterioro.

- Al tomar las mediciones de los diferentes tipos de deterioros para la generación de los modelos de regresión lineal, no se diferenció el grado de deterioro inicial de cada tramo. Sería importante hacer un análisis para determinar modelos dinámicos fragmentados que tengan en cuenta la condición inicial del pavimento para la predicción de su tasa de deterioro.
- Con las mediciones de cada uno de los deterioros medidos por el INVIAS tramo a tramo, se podría realizar la correlación de estos deterioros con el Índice Superficial de Estado (ISE), esto es, determinar el aporte de cada deterioro a la categorización cualitativa que da el INVIAS a cada tramo de vía.
- Desarrollar Matrices de transición de probabilidad y modelos de regresión lineal para pavimentos de la misma edad, lo cual permitiría mejorar aún más la calidad de las predicciones para estados futuros de cada tipo de vía y de cada tipo de deterioro de la superficie del pavimento.

RESUMEN

El buen estado de la infraestructura vial de un país es de suma importancia, no solo por la relevancia que tiene al servir de medio para la movilización de mercancías, sino también por permitir la comunicación entre diferentes localidades. La seguridad y confort que ofrecen las carreteras a los usuarios es crucial, y por lo tanto es conveniente una constante vigilancia del estado estructural y funcional de las mismas. Para este fin en Colombia el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) utiliza un criterio basado en la cuantificación del deterioro superficial, para evaluar el estado de los pavimentos, mediante el Índice Superficial de Estado (ISE). Este índice se obtiene mediante la ponderación de fenómenos de deterioro tales como Baches, Fisuras, Deformaciones, Desprendimientos, Ahuellamiento y desgaste, tanto en la calzada como en las bermas, las estructuras hidráulicas y los elementos de señalización. En la presente investigación se documenta el desarrollo de modelos estocásticos para la predicción del ISE en todo el territorio nacional, tomando en cuenta los diferentes niveles de temperatura y de volúmenes de tránsito que se presentan en los cerca de 11000 km de pavimento que componen la red del país. Se obtuvieron nueve matrices de transición de probabilidad que corresponden a la interacción de los 3 niveles (Alto, Medio y Bajo) definidos tanto para temperatura como para volumen de tránsito. Además, se desarrollaron modelos de regresión lineal para cada uno de los seis tipos de deterioros tenidos en cuenta por el INVIAS, en cada uno de los nueve diferentes escenarios de temperatura y volumen de tránsito. Se observó que los modelos presentaron buenas capacidades predictivas. Los modelos permitirán establecer el comportamiento de los pavimentos en cualquier instante de tiempo. El INVIAS podrá utilizar estas matrices de deterioro para realizar una gestión de pavimentos adecuada y oportuna, ya que permitirán la predicción de estados futuros de las carreteras. Esta herramienta será útil para la toma de decisiones respecto a asignaciones presupuestales referentes actividades de mantenimiento y en qué momento llevarlas a cabo, optimizando de esta forma los recursos disponibles.

10. BIBLIOGRAFIA

- Al-Omari, B. and Darter, M.I. "Effect of pavement deterioration types on IRI and rehabilitation". In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research. N° 1505, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 1995, pp. 57- 65.
- Al-Suleiman, T.I. and Shiyab, A.M. "Prediction of pavement remaining service life using roughness data – case study in Dubai" International Journal of Pavement Engineering 4(2): 121-129, 2010.
- ASTM E867-06 Standar Terminology Relating to Vehicule-Pavement Systems.
- C. Smith, A. Corripio. John Wiley and Sons, Principles and Practice of Automatic Process Control 3rd Edition, Agosto 2005.
- Chen, C. and Zhang, J. "A Review on flexible pavement performance life assessment". The 2010 GeoFlorida International Conference, West Palm Beach, United States, 2010.
- COST (1999). Development of new bituminous pavement design method. Cost Action 333, European Commission, Brussels.
- Daleiden, J.F., Eltahan, A.A., and Simpson, A. L. "Effectiveness of maintenance treatments of flexible pavements" In Transportation Research Record: Journal of Transportation Research. N° 1680, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2001, pp. 18-25.
- Durango-Cohen, P. Madanat, S., Optimal Maintenance and Repair Policies in Infrastructure Management Under Facility Deterioration Rates: An Adaptive Control Approach. In Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2002, 36 (9), pp. 763-778.
- Feighan K.J., Shahin M.Y. and Sinha K.C. "A dynamic approach to optimization for pavement management system". Proc. Second N. American Conf. on

Managing Pavements, sponsored by Ontario Ministry of Transportation and U.S. Federal Highway Administration, 1987, Vol. 2, pp. 2.195-2.206.

- Flintsch G. W., Zaniewski J. P. and Delton J. "Expert Project Recommendation Procedure for ADOT's Pavement Management System". Report Number AZ-SP-9701, Arizona Department of Transportation, 1997.
- Haas, Ralph. Good Technical Foundations are Essential for Successful Pavement Management, key note paper, proceedings of MAIREPAV' 03, Guimaraes, Portugal, 2003.
- Haas, Ralph C.G. and Hudson W. Ronald. "Pavement Management Systems." McGraw-Hill, Book Illustrated. 1978.
- Irfan, M., Khurshid, M.B., and Labi, S. (2009). "Service life of thin HMA overlay using different performance indicators." TRB 2009 Annual Meeting (CDROM).
- Isaacson, D. L., and Madsen, R. W. Markov chains: Theory and applications, Wiley, New York. 1976.
- Kerali, H. R., and Snaith, M. S. "NETCOM: The TRL visual condition model for road Networks." Contractor Rep. No. 321, Transport Research Laboratory, Crowthorne, U.K. 1992.
- Kiyoshi Kobayashi, Myungsik Do and Daeseok Han. "Estimation of Markovian Transition Probabilities for Pavement Deterioration Forecasting". KSCE Journal of Civil Engineering. Vol. 14 N°3. September 2009.
- LCCP "VIZIR, méthode assistée par ordinateur pour l'estimation des besoins de entretien d'un réseau routier", Paris, Décembre 1991.
- M-Ben Akiva and R. Ramaswamy. "An approach for predicting latent infrastructure facility deterioration." Transportation science. Vol. 27. N°2. May 1993.
- Morosiuk Greg., Riley Mike J., Odoki J. B. "HDM-4. Volume Six: Modelling Road Deterioration and Works Effects".

- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) 1-37A. "Guide for mechanistic- empirical design of new and rehabilitated pavements." USA. 2004.
- Ortiz García José J.; Costello Seósamh B.; Snaith Martin S. Derivation of transition probability matrices for pavement deterioration modeling. In Journal of Transportation Engineering Vol. 132. N°2, February 2006.
- Prozzi J.A. and Hong Feng. "Transportation Infrastructure Performance Modeling Through Seemingly Unrelated Regression System." ASCE Journal of Infrastructure System Vol. 129 N°14. 2008.
- Prozzi J.A. and Madanat S.M. "Development of Pavement Performance Models by Combining Field and Experimental Data". Journal of Infrastructure Systems Vol. 10 N°1. August 2004.
- R. Howard. Markov. Extension of the Limit Theorems of Probability Theory to a Sum of Variables Connected in a Chain. John Wiley and Sons, 1971.
- R.G. Mishalani and S.M. Madanat. "Computation of Infrastructure Transition Probabilities Using Stochastic Duration Models." Journal of Infrastructure System Vol. 8 N°4. December 2002.
- Gulen S., Zhu K., Weaver J., Shan J. and Flora W.F. "Development of Improvement Pavement Performance Prediction Model for the Indiana Pavement Management System". Report Series, Joint Transportation Research Program, Purdue University, 2001.
- Yang H. Huang. Pavement analysis and design, Prentice Hall. 1993.
- Yidong Yang, Manjriker Gunaratne, Jian John Lu and Bruce Dietrich. "Use of Recurrent Markov Chain for Modeling the Crack Performance of Flexible Pavement." Journal of Transportation Engineering Vol. 131 N°11. November 2005.
- Zheng Li. A probabilistic and Adaptive Approach to Modeling Performance of Pavement Infrastructure. Dissertation, Austin University of Texas, May 2005.